

STAGEVERSLAG

BUSINESS ANALYTICS

Invloed van treinverstoring op reizigersstromen

Ellis Leijte
29 maart 2013

Nederlandse Spoorwegen
afd. Proceskwaliteit & Innovatie
Laan van Puntenburg 100
3500 HA Utrecht
Begeleider:
dr. Gábor Maróti

Vrije Universiteit Amsterdam
Faculteit Exacte Wetenschappen
De Boelelaan 1105
1081 HV Amsterdam
Begeleider:
prof. dr. Rob van der Mei



Voorwoord

De afronding van de master van de opleiding Business Analytics bestaat uit het uitvoeren van een onderzoek bij een organisatie. Dit onderzoek moet aantoonbare toegevoegde waarde leveren voor het bedrijf en moet van voldoende niveau zijn voor de student. Doel van het stageverslag is om het onderzoek vast te leggen en een beschrijving van de eindproducten te geven. In dit verslag beschrijf ik mijn onderzoek als stagiair bij de Nederlandse Spoorwegen (hierna: NS).

Over het algemeen zijn de reizigersstromen goed te modelleren. Bij een verstoring verandert dit, bijvoorbeeld omdat in het begin nog niet duidelijk is welke treinen wel en niet rijden en hoe lang de verstoring gaat duren. Daarnaast kan het zijn dat de capaciteit van treinen op de omreisroutes niet toereikend is, wat ook invloed heeft op de reizigersstromen. Gedurende mijn stage heb ik onderzocht hoe de gevolgen van een verstoring in kaart kunnen worden gebracht en wat de gevolgen zijn van beperkte capaciteit en onjuiste informatie voor de reiziger.

Het onderzoek is uitgevoerd bij het bedrijfsonderdeel NS Reizigers, dat de reizigerstreinen binnen Nederland verzorgt, op de afdeling Proceskwaliteit & Innovatie. Deze afdeling implementeert beslissingsondersteunende systemen bij NS voor diverse doeleinden, zoals personeelsplanning, dienstregeling en materieelplanning. Gedurende mijn master Business Analytics heb ik dual gewerkt bij deze afdeling.

Graag wil ik prof. dr. Rob van der Mei van de Vrije Universiteit Amsterdam bedanken voor zijn begeleiding. Zijn enthousiasme en ideeën hebben geholpen bij de totstandkoming van deze scriptie. Daarnaast wil ik mijn begeleider Gábor Maróti van de Nederlandse Spoorwegen bedanken voor zijn ondersteuning en kennis van Java, L^AT_EX en Hongaarse scheldwoorden om de vaart in het onderzoek te houden. Tot slot wil ik ook Evelien van der Hurk bedanken voor haar ideeën en hulp.

Samenvatting

Wanneer er een verstoring in het treinverkeer optreedt, kan het voorkomen dat reizigers niet hun geplande route kunnen volgen of dat ze veel drukere treinen tegenkomen dan gebruikelijk. De capaciteit van treinen op de omreisroutes is niet altijd toereikend, waardoor er reizigers achter moeten blijven. Daarnaast komt de verwachte duur van een verstoring niet altijd overeen met de werkelijke duur van de verstoring.

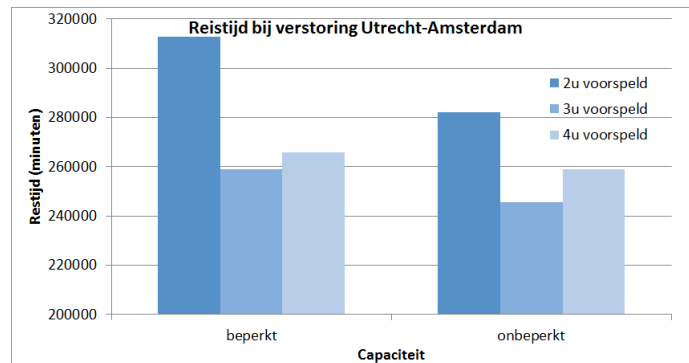
Doel van deze scriptie is om een model te ontwikkelen waarmee reizigersstromen in een onverstoorde en in een verstoorde situatie in kaart kunnen worden gebracht. Met dit model is het mogelijk om met diverse capaciteiten te testen en om reizigers een andere verwachte duur van de verstoring te geven dan de werkelijke duur. De volgende onderzoeksvraag staat hierbij centraal:

Wat is de invloed van informatie en capaciteit op de reizigersstromen bij een verstoring?

Met informatie wordt hiermee specifiek de gegeven verwachte duur van een verstoring ten opzichte van de werkelijke duur van de verstoring bedoeld. Daarnaast is gekeken naar het moment waarop reizigers de werkelijke duur van een verstoring horen. De invloed is de extra vertraging en het aantal keer dat reizigers geweigerd worden bij een trein.

Het ontwikkelde model RHO (ReizigersstromenHulpmiddel voor Openbaar vervoer) heeft de volgende aannames:

1. Reizigers bevinden zich in een onverstoorde situatie altijd op het pad waarmee ze het eerst aankomen op hun bestemming. In een verstoorde situatie verdelen zij zich volgens een kansverdeling over de mogelijke routes. Hoe groter het 'ongemak' van een route, hoe kleiner de kans dat reizigers er gebruik van maken.
2. Alle reizigers hebben alle gegeven informatie: ze weten wanneer welke treinen rijden en of er treinen niet rijden. Ze weten niet wanneer een verstoring plaats gaat vinden. Op het moment dat een verstoring plaatsvindt, hebben alle reizigers alle nieuwe gegeven informatie.
3. Treinen rijden wel of niet. Wanneer treinen wel rijden zijn ze altijd op tijd, er is dus nooit vertraging.



Figuur 1: Reistijd bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam

4. Alle reizigers vertonen hetzelfde reisgedrag.

In Figuur 1 is de reistijd te zien voor een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam die drie uur duurt. Op de y-as staat de reistijd. De drie linker kolommen geven de reistijd bij beperkte capaciteit aan, de drie rechter kolommen de reistijd met onbeperkte capaciteit. Elk van de drie kolommen geven van links naar rechts respectievelijk 2, 3 en 4 uur voorspelde duur weer. De reistijd in de kolom van 3 uur voorspeld is de minimale reistijd, als er vanaf het begin de juiste informatie wordt gegeven, is dat het resultaat. De extra reistijd bij 2 uur voorspeld en 4 uur voorspeld zijn dus het gevolg van onjuiste informatie.

Het onderschatten van de duur van de verstoring zorgt voor veel meer extra reistijd en een hoger aantal geweigerde reizigers dan het overschatten van de duur van de verstoring. Wanneer reizigers onterecht verwachten dat de verstoring bijna voorbij is, wachten ze namelijk op de eerste trein over het verstoorde traject omdat dat sneller is dan omreizen. Als vervolgens blijkt dat de verstoring nog een uur langer duurt, is er een extra grote groep reizigers op de omreisroute. Dit laatste zorgt voor een stijging van het aantal geweigerde reizigers.

Met RHO is het mogelijk om reizigersstromen in een verstoorde en onverstoorde situatie te modelleren. Dit model kan door NS gebruikt worden om bijvoorbeeld de extra reistijd en het aantal geweigerde reizigers door een verstoring te meten. Daarnaast kan het gebruikt worden om inzicht te krijgen in de gevolgen van het verkeerd inschatten van de duur van de verstoring. NS kan hiermee de informatie en capaciteit aanpassen om de hinder voor de reiziger te beperken.

Het wordt aanbevolen om RHO aan te passen om vertragingen en meerdere klanttypen te kunnen modelleren. Dit maakt het model en de resultaten realistischer. Daarnaast kan RHO gebruikt worden in combinatie met het materieelplanningsprogramma om zo de materieelplanning te optimaliseren.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
2	Probleembeschrijving	9
2.1	Onderzoeksvragen	9
2.2	Aannames	10
2.3	Niveau van modelleren	11
3	Reizigersmodellering	13
3.1	Gegevens	13
3.2	Padkeuze	14
3.3	Informatie	15
3.4	Capaciteitstoewijzing	15
4	Het simulatiemodel van Nielsen	17
4.1	Modelleren van reizigers	17
4.2	Aannames	18
4.3	Algoritme voor reizigersmodellering	19
5	Bepalen van het gewenste pad	24
5.1	Stap 1. Geografisch pad	24
5.2	Reizigersgraaf	26
5.3	Stap 2. Dienstregelpad	27
5.4	Stap 3. Verdeling reizigers over paden	29
6	Opzet van RHO	31
6.1	Schematische weergave model	31
6.2	De wereld van het model	33
7	Methoden	36
7.1	Data	36
7.2	Capaciteit	36
7.3	Verstoringen	37
7.4	Informatie	37
7.5	KPI's	38

8 Resultaten	40
8.1 Vergelijking model Nielsen	40
8.2 Invloed van capaciteit	41
8.2.1 Onverstoorde situatie	41
8.2.2 Verstoorde situatie	42
8.3 Invloed van informatie	43
8.3.1 Andere verwachting	43
8.3.2 Moment	45
8.4 Gevoeligheidsanalyse op kosten toewijzen pad	46
9 Conclusie	49
9.1 Onderzoeksvraag 1: Modelleren reizigersstromen	49
9.2 Onderzoeksvraag 2: Invloed capaciteit	49
9.3 Onderzoeksvraag 3: Invloed informatie	50
9.3.1 Tijdsduur	50
9.3.2 Moment	50
9.4 Aanbevelingen	50
9.4.1 Verder onderzoek	51
9.4.2 Uitbreidingen aan het model	51
A Gecorrigeerde wachttijden	52
B Verschillende kosten voor overstappen	54

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het is dinsdag 26 februari 2013, om 7:00 uur 's ochtends. De website van NS geeft een verstoring aan tussen Rotterdam Centraal en Gouda, deze is naar verwachting rond 9:00 uur verholpen. Een uur later is het bericht aangepast: de verstoring is naar verwachting rond 11:00 uur verholpen. Het volgende bericht komt om 10:30 uur, een halfuur voor de verwachte eindtijd van de verstoring. Opnieuw is de verwachting aangepast, de verstoring duurt nu tot 12:00 uur. Tot slot volgt het laatste bericht, rond 11:00 uur: de verstoring is naar verwachting om 11:30 uur verholpen.

Het gebeurt vaker dat de gegeven verwachte duur van een verstoring niet overeen komt met de werkelijke duur van de verstoring. Het is echter niet bekend wat de gevolgen zijn van het verkeerd inschatten van de duur van een verstoring. Levert dit extra vertraging op voor reizigers, en hoeveel? Zorgt het ervoor dat reizigers ten onrechte blijven wachten of juist gaan omreizen?

De vraag in hoeverre de geboden capaciteit gevolgen heeft voor de reiziger hangt hiermee samen. Reizigers die omreizen zorgen voor een extra belasting op de omreisroute. Zorgt dit ervoor dat reizigers op het perron moeten achterblijven omdat er te weinig plaats is? Wanneer reizigers wachten tot de verstoring voorbij is en de verstoring blijkt nog een uur langer te duren, betekent dit dat een extra grote groep reizigers mee moet met de trein over de omreisroute. Is de geboden capaciteit hiervoor toereikend?

In deze afstudeerscriptie wordt er onderzoek gedaan naar onder andere deze vragen. De volgende onderzoeksvraag staat hierbij centraal:

Wat is de invloed van informatie en capaciteit op de reizigersstromen bij een verstoring?

Wanneer er bij een verstoring meer bekend is over het gedrag en de voorkeuren van de reizigers, kan er extra informatie worden gegeven over bijvoorbeeld meerdere mogelijke omreisroutes en de verwachte drukte op die omreisroutes. Wat betreft reisinformatie kan zowel het gegeven reisadvies als de informatie die medewerkers verstrekken, verbeterd worden. Daarnaast

geeft inzicht in het gedrag van reizigers bij een verstoring ook de mogelijkheid om de materieelinzet hierop aan te passen. Zo kan er bijvoorbeeld een extra treinstel aangekoppeld worden als blijkt dat de geplande capaciteit van een trein op de omreisroute niet voldoende is. Dit kan natuurlijk alleen als er daadwerkelijk een extra treinstel beschikbaar is, en er voldoende tijd en personeel is om dit treinstel aan te koppelen.

Het onderzoek is uitgevoerd bij de Nederlandse Spoorwegen, de resultaten hebben betrekking op de delen van het landelijk spoornetwerk waar NS rijdt. Het ontwikkelde model RHO (ReizigersstromenHulpmiddel voor Openbaar vervoer) kan echter ook toegepast worden bij andere vervoerders.

Dit verslag is als volgt opgebouwd. De probleembeschrijving en een toelichting op de onderzoeksvragen komen aan bod in Hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 bevat algemene informatie over reizigersmodellering. Wanneer de lezer al bekend is met dit onderwerp kan dit hoofdstuk overgeslagen worden. Het simulatiemodel van Lars Nielsen, waar RHO op gebaseerd is, komt aan bod in Hoofdstuk 4. Vervolgens behandelen Hoofdstuk 5 en 6 de opzet van RHO. De gebruikte testmethoden en de resultaten staan in Hoofdstuk 7 en 8. Tot slot volgen in Hoofdstuk 9 conclusies en aanbevelingen.

Hoofdstuk 2

Probleembeschrijving

Deze scriptie behandelt de vraag wat de invloed is van capaciteit of informatie op de reizigers bij een verstoring. Dit hoofdstuk behandelt ten eerste de gebruikte onderzoeksvragen en gaat vervolgens in op de basis van het gebouwde model.

2.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag in deze scriptie is de volgende:

Wat is de invloed van informatie en capaciteit op de reizigersstromen bij een verstoring?

Om deze vraag goed te onderzoeken, is hij opgesplitst in een aantal deelvragen:

1. Hoe zijn reizigersstromen te modelleren?
2. Wat is de invloed van capaciteit bij een verstoring?
3. Wat is de invloed van informatie bij een verstoring?

Informatie is een erg breed begrip en omvat alles wat de reiziger weet. Dit varieert van welke treinen er hoe laat rijden, of er een verstoring is en wat de gevolgen van de verstoring zijn. Daarnaast is het ook de informatie die NS geeft: wat is het gegeven reisadvies en de verwachte duur van de verstoring.

Dit onderzoek gaat wat betreft informatie in op de rol van de verwachte duur van de verstoring en wat er gebeurt wanneer deze afwijkt van de werkelijke duur van de verstoring. Ook het moment waarop reizigers de werkelijke duur van de verstoring te horen krijgen, kan een rol spelen. Daarom is onderzoeksvraag 3 gesplitst in twee deelvragen:

3a. Wat is de invloed van de geschatte verwachte duur van een verstoring?

3b. Wat is de invloed van het moment waarop reizigers de werkelijke duur van de verstoring horen?

Om de invloed van informatie en capaciteit te meten is er een programma nodig waarmee de reizigersstromen te modelleren zijn. Onderdeel van deze stage is het bouwen van het model RHO dat deze functionaliteit heeft. In RHO is het ook mogelijk de informatie en capaciteit in te stellen om vervolgens onderzoeksvragen 2 en 3 te beantwoorden en tot slot de algemene onderzoeksvraag.

2.2 Aannames

Het proefschrift van Nielsen (2011) bevat een algoritme voor reizigersmodellering. Dit model bevat echter een aantal onrealistische aannames, die in dit onderzoek verbeterd worden. RHO werkt met de volgende aannames:

1. *Reizigers bevinden zich in een onverstoorde situatie altijd op het pad waarmee ze het eerst aankomen op hun bestemming. In een verstoorde situatie verdelen zij zich volgens een kansverdeling over de mogelijke routes. Hoe groter het 'ongemak' van een route, hoe kleiner de kans dat reizigers er gebruik van maken.* In het model van Nielsen bevinden reizigers zich ook bij een verstoring op de route waarmee zij zo vroeg mogelijk aankomen op hun bestemming. Dit is om drie redenen onrealistisch. Ten eerste kent de reiziger waarschijnlijk niet de hele aangepaste dienstregeling en weet hij dus niet altijd wat het kortste pad is. Ten tweede kost het een reiziger tijd om te reageren op een verstoring en om nieuwe informatie over een alternatieve route te verzamelen. Ten derde kiest de reiziger soms bewust een ander pad dan het kortste pad, bijvoorbeeld omdat hij liever over een bekend traject reist of zo min mogelijk wilt overstappen.
2. *Alle reizigers hebben alle gegeven informatie: ze weten wanneer welke treinen rijden en of er treinen niet rijden. Ze weten echter niet wanneer een verstoring plaats gaat vinden. Op het moment dat de verstoring plaats vindt, hebben alle reizigers alle nieuwe gegeven informatie.* Het verschil met het model van Nielsen is dat in dit onderzoek de gegeven informatie over de verwachte duur van een verstoring op een later tijdstip onjuist blijkt te zijn. Ook wordt er gevarieerd met het moment waarop reizigers de werkelijke duur van een verstoring te horen krijgen.
3. *Treinen rijden wel of niet. Wanneer treinen rijden, zijn ze altijd op tijd. Er is dus nooit vertraging.*

4. *Alle reizigers vertonen hetzelfde reisgedrag.*

De laatste twee aannames komen overeen met het model van Nielsen. In werkelijkheid rijden er treinen met vertraging en reageren niet alle reizigers op dezelfde manier. Voor deze aannames is gekozen vanwege de beperkte tijd van dit onderzoek.

2.3 Niveau van modelleren

Het modelleren van reizigers kan op drie verschillende niveaus.

1. *Individueel* Iedere reiziger is anders. Met behulp van OV-Chipkaart gegevens kan iedere reiziger afzonderlijk gemodelleerd worden. Met behulp van data analyse op gegevens van iedere OV-Chipkaart komt er op deze manier een reispatroon op individueel niveau uit. Deze methode is erg tijdrovend. Er moet data analyse op iedere kaart apart worden uitgevoerd en het levert daarnaast relatief weinig informatie op.
2. *Klanttypen & Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd* De afdeling Markt-Onderzoek en Advies (MOA) heeft binnen NS onderzoek gedaan naar verschillende klanttypen. Hieruit bleek dat op basis van de voorkeuren en keuzes alle individuele reizigers in te delen zijn in slechts zes klanttypen. Het samenvoegen van individuele personen in een groep waarbij iedereen zich hetzelfde gedraagt, is eerder gezien in Jones (1979). Het gedrag van reizigers is bijvoorbeeld anders wanneer het de dagelijkse reis naar werk betreft dan de reis naar een uitje. Ook is de reiziger meer op zoek naar zekerheid wanneer hij niet bekend is met het traject dan wanneer hij er bijna dagelijks reist.

In de Herkomst/Bestemmingsmatrix staat voor elke Herkomst/Bestemming combinatie hoeveel reizigers er op elk tijdstip gebruik van willen maken. Om de reizigers te modelleren op klanttype moet voor elke groep reizigers uit de matrix bekend zijn hoe de opdeling in de verschillende klanttypen er uit ziet en wat het gedrag is van elk klanttype bij een verstoring. De gegevens over de verschillende klanttypen zijn echter niet op dit niveau beschikbaar, waardoor het nog niet mogelijk is klanttypen in RHO te verwerken.

3. *Herkomt/Bestemmingsmatrix op tijd* Deze methode maakt ook gebruik van de Herkomst/Bestemmings matrix op tijd, maar maakt geen onderscheid tussen verschillende klanttypen. Het is een vereenvoudigde manier van de tweede methode. Dit is minder realistisch, maar wel eenvoudiger te modelleren en vereist minder gegevens.

Voor het modelleren op niveau 2 zijn er op dit moment te weinig gegevens bekend over de verdeling van de verschillende klanttypen over de Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd. Voor niveau 1 geldt dat de hoeveelheid data analyse voorafgaand aan het modelleren teveel tijd kost voordat het gebruikt kan worden in het onderzoek. Om deze redenen is ervoor gekozen om op niveau 3 te modelleren. Model RHO is zo gebouwd dat het na afronding van dit onderzoek mogelijk is om uit te breiden naar meerdere klanttypen.

Hoofdstuk 3

Reizigersmodellering

Reizigersmodellering is belangrijk omdat NS met deze informatie de service kan verbeteren. Met meer kennis van het gedrag van reizigers kan, voornamelijk in geval van een verstoring, zowel de reisinformatie als de materieelinzet verbeterd worden. Naast de diverse soorten gegevens die gebruikt kunnen worden bij reizigersmodellering kan het modelleren van de padkeuze op verschillende manieren en hebben ook de informatie en de capaciteitstoeewijzing invloed op de reis. Dit hoofdstuk behandelt deze vier gebieden rondom reizigersmodellering.

3.1 Gegevens

Bij NS wordt op drie verschillende manieren gegevens verzameld over reizigersstromen. De verkoop van losse kaartjes en trajectabonnementen geven extra informatie maar die informatie lastig te gebruiken omdat daarbij niet bekend is wanneer er gebruik van is gemaakt. Daarom zijn deze niet opgenomen in de drie manieren.

Conducteursschattingen Wanneer een conducteur een ronde door de trein heeft gelopen, kan hij in de Railpocket, de zakcomputer van conducteurs, aangeven hoeveel reizigers er ongeveer in die trein zaten op dat traject. Aangezien conducteurs geregeld rondes door de trein lopen, levert dit voor elke trein op vele dagen schattingen op. Tellingen laten zien dat de conducteursschattingen over het algemeen te hoog zijn.

Meten-in-de-Trein Er worden steekproefsgewijs Meten-in-de-Trein tellingen gehouden, waarbij tussen twee stations in een aantal rijtuigen het aantal reizigers geteld wordt. Wanneer er veel reizigers zijn en/of een erg kort traject, is er niet genoeg tijd om tussen twee stations te tellen en zijn er geen metingen. Daarnaast zijn er aan het begin en einde van elke dag en in het weekend weinig metingen. Een reizigerstelling met

Meten-in-de-Trein komt dichterbij het werkelijke aantal dan een conducteurschatting.

OV-Chipkaart Met invoering van de OV-Chipkaart is er een derde manier bijgekomen om gegevens over het aantal reizigers in de trein te verzamelen. Aan de hand van OV-Chipkaart gegevens kan een Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd worden afgeleid. Dan is er bekend hoeveel reizigers op welk moment waarheen hebben gereisd. Er is niet bekend welke treinen ze hebben genomen. De Herkomst/Bestemmingsmatrix bevat alleen de reizigers die van een OV-Chipkaart gebruik maken.

Dit onderzoek maakt gebruik van een Herkomst/Bestemmingmatrix op tijd, gebaseerd op de OV-Chipkaart gegevens.

3.2 Padkeuze

Het gebied rondom padkeuze vormt de kern van reizigersmodellering. Hier wordt namelijk bepaald welke route de reiziger kiest, gegeven de omstandigheden. Er zijn diverse mogelijkheden voor het bepalen van de route, de onderstaande twee methodes zullen in dit onderzoek terug komen. Een ander model voor padkeuze is bijvoorbeeld het minimaliseren van de regret, zoals beschreven in Chorus et al. (2008).

- *Minste kosten.* Bij deze mogelijkheid wordt er van uitgegaan dat de reiziger altijd op het kortste pad naar zijn bestemming zit, dus het pad met de vroegst mogelijke aankomst. Dit is eenvoudig te modelleren, alleen het pad van herkomst naar bestemming met de vroegst mogelijke aankomst hoeft namelijk berekend te worden. Het kiezen voor het kortste pad is te modelleren als ‘Expected Utility Maximization’, meer uitleg over deze methode staat in Meyer (1987), de reiziger kiest voor het pad met de meeste verwachte voordeel of, in dit geval, de minste verwachte kosten.
- *Kansverdeling* Voor het modelleren van de padkeuze is een kansverdeling gebruikelijk, bijvoorbeeld een logit model, te lezen in Hunt (1990). Dit model gaat uit van een eindig aantal mogelijkheden die de reiziger heeft om van zijn startpunt naar zijn bestemming te komen en bepaalt op basis van de kosten van een route de kans dat een reiziger die route kiest. Deze kosten zijn het ‘ongemak’ die de reiziger voelt als hij een bepaalde route kiest, bijvoorbeeld de reistijd en het aantal keer overstappen maar ook de (on)bekendheid van de route kan meespelen. De kans dat een reiziger wordt toegewezen aan een route hangt samen met het ongemak: hoe lager het ongemak, hoe groter de kans.

3.3 Informatie

Reisinformatie beïnvloedt de padkeuze van de reiziger, zo blijkt ook uit Cats et al. (2012). Uit de reisinformatie haalt de reiziger bijvoorbeeld wat de reistijd is van de verschillende routes en het gegeven reisadvies. Het is niet te meten hoeveel iedere reiziger weet van de (aangepaste) dienstregeling. Dit maakt het modelleren van de rol van informatie lastig. De aanname dat reizigers alles weten zorgt voor een bovengrens aan de oplossing, dit laten Cats et al. (2011) ook zien. Dat wil zeggen dat de werkelijke situatie even goed of slechter is dan de oplossing uit het model, maar nooit beter.

Ook in het verkeer blijkt informatie een rol te spelen bij het kiezen van een route. Uit Han et al. (2008) blijkt dat het gegeven reisadvies invloed heeft op de padkeuze, maar het effect hangt af van het soort reiziger. Hoewel een groot gedeelte van de reizigers deze route juist zou kiezen, zullen sommige reizigers juist een andere route kiezen, vanwege de verwachte drukte op de geadviseerde route. Naast het reisadvies geeft de reisplanner de reistijd van de verschillende routes, maar hier zit zeker bij verstoringen een mate van onzekerheid in. Volgens Ettema and Timmermans (2006) zijn de kosten van reistijdonzekerheid significant, dit speelt dus wel degelijk mee bij het bepalen van een padkeuze. Hoewel reizen op de weg niet hetzelfde is als reizen met het openbaar vervoer, is de kern in beide gevallen dat reizigers van een startpunt naar hun bestemming willen reizen.

NS kan de reizigersstromen bij een verstoring beïnvloeden door middel van een reisadvies. Daarnaast kunnen de medewerkers op de stations en in de treinen de reizigers adviseren over de situatie. Volgens Chorus et al. (2007) verbetert informatie niet alleen de kwaliteit van de padkeuze, naarmate er meer alternatieven worden gepresenteerd zullen mensen minder snel op zoek gaan naar een nieuw alternatief. NS kan dit gebruiken om de padkeuze te verbeteren door de beste alternatieven te presenteren. Dit verkleint de kans dat reizigers zelf op zoek gaan naar een alternatief en zo bij een slechter pad terecht komen.

Informatie is een erg breed begrip en omvat alles wat de reiziger weet. Dit varieert van welke treinen er hoe laat rijden, of er een verstoring is en wat de gevolgen van de verstoring zijn. Daarnaast is het ook de informatie die NS geeft: wat is het gegeven reisadvies en de verwachte duur van de verstoring. Dit onderzoek gaat in op de rol van de verwachte duur van de verstoring en wat er gebeurt wanneer deze afwijkt van de werkelijke duur van de verstoring.

3.4 Capaciteitstoewijzing

In de planning wordt op basis van het verwachte aantal reizigers de totale beschikbare capaciteit verdeeld over de te rijden treinen. Met reizigersmo-

dellering is bekend of er voldoende capaciteit is voor alle reizigers op de omreisroutes of dat de capaciteit van sommige treinen, indien mogelijk, groter moet. Elke trein moet voldoende plaats bieden aan het verwachte aantal reizigers, met natuurlijk een extra marge voor de dagen dat het drukker is dan gemiddeld.

Bij een verstoring wijkt het aantal reizigers af van de normale situatie, zo kunnen er meer extra reizigers met de trein willen dan er in de marge rekening mee is gehouden. De bijsturing kan deze informatie gebruiken om te bekijken of de capaciteit van deze treinen vergroot kan worden.

Bij het bepalen van de materieelinzet bij NS wordt gebruik gemaakt van het materieelplanningsprogramma TAM, gebaseerd op de thesis van Nielsen (2011). TAM stuurt op het minimaliseren van de doelfunctie, terwijl moet worden voldaan aan een aantal randvoorwaarden. In de doelfunctie worden kosten toegekend aan bijvoorbeeld plaatstekorten (de trein biedt niet voldoende plaats met deze capaciteit), het aantal kilometers dat het materieel aflegt (de kosten voor het gebruik van materieel) en het aantal rangeerbewegingen. Een paar voorbeelden van randvoorwaardes zijn perronlengtes, een trein mag nooit langer zijn dan het kleinste perron waar hij stopt, en verplichte materieelsoorten op bepaalde trajecten, bijvoorbeeld in verband met onderhoud aan het materieel

Het is mogelijk om met het reizigersmodel de materieelinzet iteratief te optimaliseren. In dat geval berekent het systeem eerst het aantal reizigers op elke route wanneer er een onbeperkte capaciteit is. Op deze verwachte aantal reizigers wordt een materieelinzet bepaald. Wanneer een trein niet genoeg plaats biedt aan alle reizigers die er gebruik van willen maken, zal een aantal reizigers een andere route moeten nemen. Dit resulteert dus in een nieuw aantal reizigers per traject. Deze iteratie kan herhaald worden tot er een evenwicht is bereikt.

Hoofdstuk 4

Het simulatiemodel van Nielsen

Er is reeds theorie beschikbaar over reizigersmodellering bij NS, die ook gebruikt kan worden bij verstoringen. In 2011 promoveerde Lars Nielsen op het proefschrift: “Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways”. Hierin behandelt hij voornamelijk een model voor de materieelplanning in geval van verstoringen, zoals de titel ook aangeeft. Daarnaast is onderdeel van de thesis een model voor het simuleren van reizigersgedrag.

Zijn model voor reizigersgedrag is goed bruikbaar, hoewel het doel van de simulatie anders is. Het uiteindelijke doel is namelijk om de materieelomloop te optimaliseren. In een aantal iteraties berekent Nielsen steeds een nieuwe materieelomloop en daarop volgend weer nieuwe reizigersstromen, tot er een evenwicht is. Het doel van reizigersmodellering met RHO is om inzicht te krijgen in de reizigersstromen bij een verstoring. In dit hoofdstuk wordt het simulatiemodel van Nielsen besproken, wat de basis vormt voor het verdere onderzoek. Het hoofdstuk is geheel gebaseerd op Hoofdstuk 5 van de thesis van Nielsen (2011).

4.1 Modelleren van reizigers

Elke reiziger heeft een starttijd, een begin- en eindstation en een deadline. De reisstrategie houdt bij het onderzoek van Nielsen in dat reizigers zo vroeg mogelijk aankomen op het gewenste eindstation. Als er meerdere paden zijn waarvoor dit geldt, kiezen ze eerst voor het pad met het kleinste aantal overstappen en vervolgens voor het pad die het eerst vertrekt. Wanneer de reiziger op het moment van de deadline niet op zijn eindstation is aangekomen, stopt hij met reizen en verdwijnt hij dus uit het systeem. Het model verwerkt reizigers in zogenoemde reizigersgroepen, waarin reizigers met dezelfde eigenschappen gebundeld worden.

Aangezien treinen een beperkte capaciteit hebben, kan het voorkomen dat het aantal reizigers dat mee wil de capaciteit overschrijdt. In dat geval splitst de groep. De reizigers die niet meer met de gewenste rit meekunnen, moeten via een andere weg reizen. Er reizen dan meerdere groepen van dezelfde reizigersgroep over verschillende paden. Het programma slaat deze verschillende groepen op in houders, dit begrip wordt in Sectie 4.3 verder uitgelegd. Hoewel reizigers met dezelfde eigenschappen dus gebundeld zijn in één reizigersgroep, kan het voorkomen dat deze reizigers uiteindelijk over andere paden gaan reizen.

4.2 Aannames

Voor het simuleren van reizigersstromen zijn er een aantal aannames gemaakt over reizigersgedrag. De reden voor deze aannames is ten eerste dat ze de simulatie sneller maken en ten tweede dat de focus van het onderzoek op materieel blijft. De snelheid is van belang omdat het model in een iteratief proces zit en dus meerdere keren aangeropen wordt. De focus op materieel blijft behouden als er zo min mogelijk verschillende instellingen voor het reizigersmodel zijn, zo kunnen veranderingen in het resultaat teruggevoerd worden op gewijzigde instellingen bij het plannen van het materieel.

1. *Reizigers kennen de gehele (aangepaste) dienstregeling, ze weten dus precies welke treinen rijden en waar ze stoppen.* De reizigers kennen de dienstregeling vóór en na de verstoring. Ze weten dus wat alle vertrek- en aankomsttijden volgens de planning zijn, maar ook welke treinen er wanneer rijden nadat de verstoring heeft plaatsgevonden, en wanneer de verstoring afgelopen is. De reizigers weten niet wat de capaciteit is van de geplande treinen. Ze weten ook pas van de verstoring op het moment dat deze plaatsvindt en niet eerder.
2. *Reizigers bevinden zich altijd op hun kortste pad zolang capaciteit beschikbaar is (mochten zij niet meer in hun gekozen trein passen, berekenen ze vanaf dat punt een nieuw kortste pad).* Het toepassen van de reisstrategie geeft als resultaat dat reizigers altijd op hun kortste pad zitten, zolang de capaciteit dat toelaat.
3. *Een reiziger reist totdat hij zijn bestemming heeft bereikt, of zijn deadline (maximum reistijd) verstreken is.* Reizigers stoppen met reizen wanneer ze volgens de strategie een rit kiezen die na de deadline bij de volgende knoop aankomt. Op dat moment verdwijnen ze uit het model en nemen ze ook geen plaats meer in.

Wanneer er meer reizigers met een rit mee willen dan er capaciteit is, gaan van elke reizigersgroep het aantal reizigers proportioneel naar de

grootte van die reizigersgroep mee. Een voorbeeld: als een reizigersgroep 60% uitmaakt van het totaal aantal reizigers dat met de rit meewil, dan wordt 60% van de capaciteit gevuld door die reizigersgroep. Alle reizigers die niet mee kunnen, blijven op het station en kiezen volgens hun strategie een nieuw pad.

4.3 Algoritme voor reizigersmodellering

In deze sectie wordt het algoritme beschreven dat het model met de gegeven aannames implementeert. Kort gezegd loopt het algoritme de tijdslijnen langs op volgorde van vertrektijd en verplaatst de reizigersgroepen op basis van hun strategie. Om bij te houden waar reizigers zich bevinden, maakt het algoritme gebruik van houders. Met behulp van houders weet het programma hoeveel reizigers van welke reizigersgroep op welke knoop staan, en van welke ritlijn zij het laatst gebruik hebben gemaakt. De laatste eigenschap geeft aan of de reizigers al in de trein zaten en dus verzekerd zijn van een plaats. Het algoritme is te zien in Algoritme 1, en staat beschreven in Nielsen (2011).

- In de eerste drie regels van het algoritme wordt het model geïnitieerd. In de variabele S worden alle reizigersgroepen opgeslagen in houders. De variabele L bevat alle lijnen van de reizigersgraaf gesorteerd op vertrektijd. Uiteindelijk geeft het algoritme de functie $f(a, p)$ terug, deze functie geeft het aantal reizigers op rit a van reizigersgroep p .
- Vervolgens start de simulatie en worden de lijnen van de graaf op tijdsvolgorde langsgelopen. Voor elke lijn wordt in regel 5 de beginknoop en de opvolgende knoop opgeslagen en de voorgaande trein van a in a_{pred} in regel 6.
- De verzameling S' zoals gedefinieerd in regel 7 bevat alle houders die met de huidige lijn a mee willen reizen op basis van hun strategie. In regel 8 wordt de verzameling S'' als deelverzameling van S' gedefinieerd van alle houders die al in de trein zitten. Alle reizigers uit de verzameling S'' hebben dus gegarandeerd een plek. In regel 9 wordt de resterende capaciteit berekend door het aantal reizigers uit de verzameling S'' hiervan af te halen.
- In de for-loop die begint in regel 10 wordt voor elke reizigersgroep die met de rit wilt reizen, berekend hoeveel reizigers er met de rit meekunnen en hoeveel er een alternatieve route moeten nemen. De variabele u bevat het aantal reizigers dat van de betreffende groep meereist. Wanneer de groep al in de trein zat, wordt de hele groeps grootte toegewezen aan u in regel 12.

Input: Passenger Graph $G = (V, A)$, set of passenger groups P
Output: Flow function $f : A \times P \rightarrow \mathbb{R}$

- 1 $S := (p, (o_p, \tau_p), n_p, \phi) | p \in P;$
- 2 $L :=$ An ordering of A by departure time;
- 3 Let $f(a, p) := 0$ for all $a \in A, p \in P;$
- 4 **foreach** $a \in L$ **do**
- 5 Let (s, τ) and (r, σ) be the departure and arrival nodes of a respectively;
- 6 Let a_{pred} be the predecessor of $a;$
- 7 $S' = \{g = (p, (s, \tau), n, b) \in S \mid g \text{ wants to travel with } a\};$
- 8 $S'' = \{g = (p, (s, \tau), n, b) \in S' \mid g \text{ is already in the train (i.e. } b = a_{pred})\};$
- 9 $c := \text{cap}(a) - \sum_{g \in S''} n(g);$
- 10 **foreach** $g \in S'$ **do**
- 11 **if** $b = a_{pred}$ **then**
- 12 $u := n(g);$
- 13 **else**
- 14 $u := \min\{n(g), c \cdot n(g) / \sum_{g' \in S' \setminus S''} n(g')\};$
- 15 **end**
- 16 $S := S \setminus g;$
- 17 **if** $u < n$ **then**
- 18 Let (s, τ') be the next departure node at station $s;$
- 19 $S := S \cup \{(p(g), (s, \tau'), n - u, \phi)\};$
- 20 **end**
- 21 **if** $r \neq d_p$ **then**
- 22 $S := S \cup \{(p(g), (r, \sigma), u, a)\};$
- 23 **end**
- 24 $f(a, p) := f(a, p) + u;$
- 25 **end**
- 26 **end**
- 27 **return** $f;$

Algoritme 1: Het algoritme van Nielsen voor reizigerssimulatie

- Als de groep nog niet in de trein zat, wordt in regel 14 bepaald of de groep het beschikbare deel van de capaciteit opvult of nog minder dan het beschikbare deel nodig heeft. Dat laatste is het geval wanneer de capaciteit voldoende is voor alle reizigers die met de rit willen reizen. Hoe het beschikbare deel van de capaciteit wordt bepaald, is uitgelegd in Sectie 4.2.
- In regel 16 wordt de behandelde houder uit S gehaald en indien nodig door een of twee nieuwe houders vervangen.
- De reizigers die niet met a mee kunnen, worden in regels 18 en 19 in een nieuwe houder op hetzelfde station op de volgende knoop geplaatst. Daarnaast is er een nieuwe houder voor alle reizigers die wel met a mee kunnen, deze zet de reizigers op de eerstvolgende knoop op het aankomststation neer.
- Wanneer het aankomststation ook de bestemming is van de reizigersgroep, stopt de groep met reizen en hoeft er dus ook geen nieuwe houder gemaakt te worden. De check in regel 21 zorgt ervoor dat reizigers die nog niet op hun eindbestemming zijn, in een nieuwe houder terecht komen.
- De for-loop eindigt met een update van de reizigersstroom in regel 24.

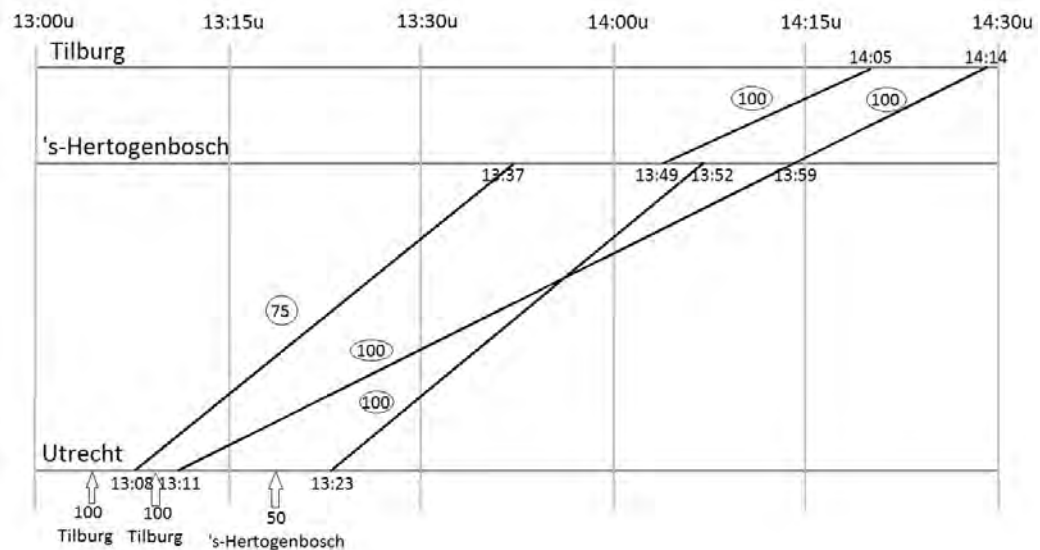
Aan de hand van een eenvoudig voorbeeld wordt de werking van dit algoritme verduidelijkt.

Voorbeeld 1. *Op de reizigersgraaf van Figuur 4.1 laten we drie reizigersgroepen instromen, één vlak voor vertrek van elk van de drie treinen uit Utrecht. De eerste twee reizigersgroepen hebben een grootte van 100 en bestemming Tilburg, de derde reizigersgroep bestaat uit 50 personen die naar 's-Hertogenbosch reizen. Alle reizigers hebben een deadline om 14:15 uur. Ook wordt er capaciteit aan de ritlijnen toegekend: elke rit heeft een capaciteit van 100 met uitzondering van de trein die om 13:08 uur vertrekt vanaf Utrecht, deze heeft een capaciteit van 75. Dit voorbeeld is te zien in Figuur 4.1.*

In het algoritme worden om te beginnen de ritlijnen geordend op vertrektijd. Hierbij komen eerst de drie treinen uit Utrecht, van 13:08u, 13:11u en 13:23u, en vervolgens de treinen in 's-Hertogenbosch met vertrektijden 13:49u en 13:59u. Deze ritlijnen lopen we langs:

13:08 uur, van Utrecht naar 's-Hertogenbosch

Van deze rit willen alleen de 100 reizigers van groep 1 gebruik maken. De rit heeft een capaciteit van 75, dus 75 reizigers van groep 1 gaan mee en 25 reizigers van groep 1 blijven in Utrecht en moeten vanaf daar een nieuw kortste pad berekenen.



Figuur 4.1: Voorbeeld van een reizigersgraaf van Utrecht naar Tilburg met reizigersgroepen en capaciteit

13:11 uur, van Utrecht via 's-Hertogenbosch naar Tilburg

Hier willen 25 reizigers van groep 1, 100 reizigers van groep 2 en geen reizigers van groep 3 gebruik van maken. Deze rit heeft een capaciteit van 100. Van groep 1 kunnen er $100 \cdot 25 / (100 + 25) = 20$ reizigers mee en van groep 2 $100 \cdot 100 / (100 + 25) = 80$ reizigers. Er blijven dus van groep 1 $25 - 20 = 5$ reizigers achter en van groep 2 $100 - 80 = 20$ reizigers.

13:23 uur, van Utrecht naar 's-Hertogenbosch

Met de laatste rit vanuit Utrecht willen de resterende 5 reizigers van groep 1 en 20 reizigers van groep 2 reizen, alsmede de 50 reizigers van groep 3. Aangezien de rit een capaciteit van 100 reizigers heeft, gaan zij allen mee en blijven er geen reizigers achter op het station.

13:49 uur, van 's-Hertogenbosch naar Tilburg

In 's-Hertogenbosch vertrekt de eerste trein met een capaciteit van 100 passagiers. Hiervan willen de 75 reizigers van groep 1 gebruik maken, die om 13:37 uur met de eerste rit uit Utrecht in 's-Hertogenbosch aankwamen. Zij kunnen allen mee.

Tijd	Van	Naar	Cap.	Groep 1	Groep 2	Groep 3
13:08u	Utrecht	Den Bosch	75	75 v/d 100	-	-
13:11u	Utrecht	Den Bosch	100	20 v/d 25	80 v/d 100	-
13:23u	Utrecht	Den Bosch	100	5 v/d 5	20 v/d 20	50 v/d 50
13:49u	Den Bosch	Tilburg	100	75 v/d 75	-	-
13:59u	Den Bosch	Tilburg	100	20 v/d 25	80 v/d 100	-

Tabel 4.1: Tabel met het aantal reizigers per trein tussen Utrecht en Tilburg

13:59 uur, van 's-Hertogenbosch naar Tilburg

De tweede trein van 's-Hertogenbosch naar Tilburg is de sprinter die om 13:11 uur uit Utrecht vertrokken is. In deze trein zitten reeds 100 reizigers die allen doorreizen naar Tilburg. Er kunnen geen nieuwe reizigers mee. De 25 passagiers die met de trein van 13:23 uur uit Utrecht vertrokken zijn en eindbestemming Tilburg hebben, kunnen dus niet meer mee. Zij waren wel al eerder in 's-Hertogenbosch waren maar komen niet meer voor de deadline van 14:15 uur in Tilburg aan. Ze verlaten het systeem in 's-Hertogenbosch.

Resultaat

De verdeling van het aantal reizigers per rit is te zien in Tabel 4.1. In deze tabel staat per groep het aantal reizigers dat met de rit mee gaat en het aantal reizigers dat met die rit mee had willen gaan.

Hoofdstuk 5

Bepalen van het gewenste pad

Op het moment dat reizigers het systeem binnenkomen, is niet bekend welke route ze willen volgen. Om deze reden moet het gewenste pad worden bepaald. Het bepalen hiervan gaat in drie stappen.

1. Bepaal de mogelijke geografische paden
2. Bepaal de bijbehorende paden in de dienstregeling
3. Verdeel reizigers over de dienstregelpaden

In dit hoofdstuk zijn deze drie stappen nader toegelicht.

5.1 Stap 1. Geografisch pad

De eerste stap van het vinden van het gewenste pad voor de reizigers is om alle interessante geografische paden van het station van herkomst naar het station van bestemming te vinden. Bij de geografische paden zijn geen specifieke treinen bekend, alleen de stations waar de reiziger overstapt. Wanneer een geografisch pad alleen het begin- en eindstation bevat, heeft de reiziger een directe verbinding. Dit onderdeel beschrijft hoe de geografische paden gevonden worden en hoe deze worden opgeslagen.

Er zijn vele manieren om van een station naar een andere te komen. Het grootste deel hiervan kan echter buiten beschouwing gelaten worden omdat ze zoveel langer duren dan het kortste pad. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 5.1.

Dit figuur toont een aantal manieren om van Utrecht Centraal naar Den Haag Centraal te reizen. De vaste lijn geeft een directe verbinding weer, maar uit de stippellijnen blijkt dat de reizigers ook via Noord-Holland of juist via 's-Hertogenbosch kunnen reizen. Daarnaast zijn er routes via alle



Figuur 5.1: Voorbeeld van onzinnige paden tussen Utrecht Centraal en Den Haag Centraal

bestaande stations te bedenken. Het ligt voor de hand dat deze routes buiten beschouwing gelaten kunnen worden.

Om de relevante geografische paden af te leiden, maakt het model gebruik van het zogenoemde lijnvoeringsmodel. Dit model is ontwikkeld door de afdelingen Proceskwaliteit & Innovatie en MarktOnderzoek & Advies binnen NS. Het lijnvoeringsmodel:

bepaalt de treinseries en de frequentie

gegeven reizigersvraag en kosten die reizigers toekennen aan o.a. wachttijd en overstappen

met restricties van het spoorstelsel, zoals het aantal treinen dat per uur over een bepaald stuk spoor kan.

Het resultaat is *geen* dienstregeling, er staat alleen welke treinen rijden en hoe vaak, zonder de vertrek- en aankomsttijden. Onderdeel van het lijnvoeringsmodel is dat er voor de reizigers op een gegeven lijnvoering relevante routes worden gevonden. Hierbij worden aan alle mogelijke routes toegekend, die onder andere afhangen van reistijd, wachttijd, frequentie en aantal keer overstappen. Aan de hand van de minste kosten die aan een route zijn toegekend wordt een threshold ingesteld. Dit houdt in dat routes met kosten van meer dan 1,5 keer de minimale kosten niet meegenomen worden.

De relevante geografische paden worden dus bepaald door aan dit lijnvoeringsmodel de gebruikte lijnvoering mee te geven en de relevante routes eruit te halen. Een geografisch pad is omschreven door de stations waar de reiziger over moet stappen. Voorbeeld 2 verduidelijkt dit.

Voorbeeld 2. *Het lijnvoeringsmodel geeft voor reizigers van Utrecht Centraal naar Almere op de lijnvoering van 2012 de volgende geografische paden:*

1. *Utrecht Centraal, Almere Centrum*
2. *Utrecht Centraal, Amsterdam Zuid, Almere Centrum*

Het eerste pad geeft aan dat reizigers met een directe verbinding, dus zonder over te stappen, van Utrecht Centraal naar Almere Centrum reizen. De tweede route laat reizigers overstappen op Amsterdam Zuid.

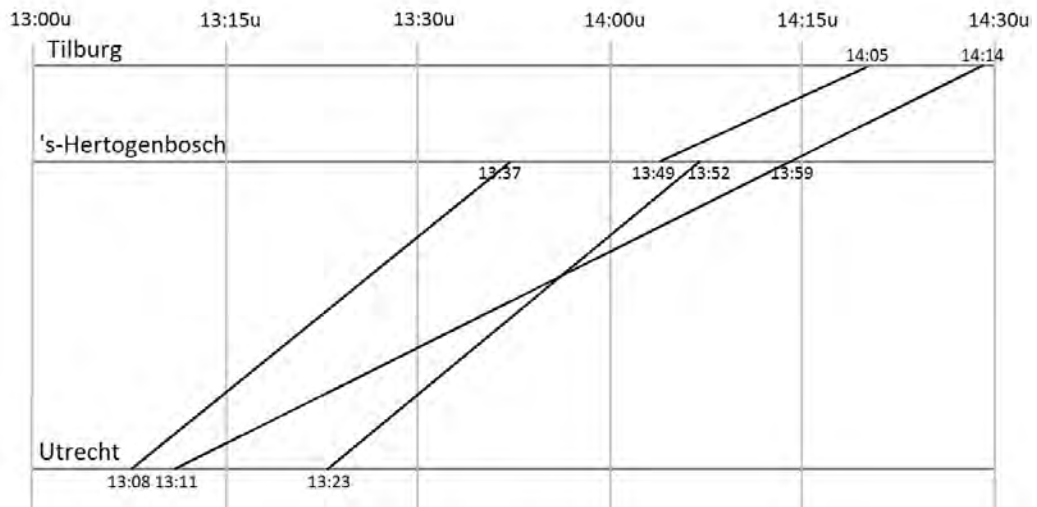
Het model slaat alle geografische paden per herkomst-bestemmingcombinatie op. Wanneer een reiziger een gewenst pad gaat berekenen, gebruikt hij deze lijst met geografische paden om de bijbehorende dienstregelpaden te bepalen.

5.2 Reizigersgraaf

In de reizigersgraaf kunnen reizigers aan specifieke treinen gekoppeld worden, deze graaf beweegt als het ware de reizigers in het systeem. De reizigersgraaf ziet er als volgt uit. Voor elk tijdstip van vertrek of aankomst van een trein op een station wordt een knoop toegevoegd. Vervolgens worden er lijnen toegevoegd voor elke mogelijkheid die reizigers op het station hebben. De lijnen zijn in te delen in twee groepen:

1. Tijdslijnen verbinden twee opeenvolgende knopen van hetzelfde station met elkaar. Deze geven de mogelijkheid aan om te wachten op het station.
2. Ritlijnen geven de mogelijkheid weer om te reizen, en verbinden dus twee knopen met elkaar wanneer er op dat moment een trein van het ene naar het andere station rijdt.

Voorbeeld 3. *Figuur 5.2 bevat een voorbeeld van een reizigersgraaf. Deze heeft beginstation Utrecht, tussenstation 's-Hertogenbosch en eindstation Tilburg, starttijd 13:00 uur en eindtijd 14:15 uur. De horizontale lijnen bij de stations zijn de tijdslijnen, die aangeven dat de reiziger op het station kan wachten. De schuine lijnen geven de ritten weer. Bij elke knoop staat het tijdstip aangegeven van de gebeurtenis. Wanneer een trein vertrekt, kiest de reiziger om wel of niet mee te gaan. Aan de tijdslijnen wordt een onbeperkte*



Figuur 5.2: Voorbeeld van een reizigersgraaf van Utrecht via 's-Hertogenbosch naar Tilburg

capaciteit toegewezen en aan de ritlijnen de capaciteit van het geplande materieel.

Een reis van Utrecht naar Tilburg is op twee manieren mogelijk, maar loopt altijd via 's-Hertogenbosch. De eerste mogelijkheid is met de stoptrein die twee keer per uur naar Tilburg rijdt, in de graaf vertrekt deze om 13:11 uur. De tweede mogelijkheid is om de intercity van 13:08 uur of 13:23 uur naar 's-Hertogenbosch te nemen en daar over te stappen op een stoptrein naar Tilburg. Eénmaal per halfuur kom je op de stoptrein terecht die eerder vanuit Utrecht is vertrokken. Dit is ook terug te zien in de getoonde reizigersgraaf.

5.3 Stap 2. Dienstregelpad

Na de eerste stap zijn er voor elke herkomst-bestemming combinatie één of meerdere geografische routes beschikbaar. De geografische route geeft de stations waar reizigers over moeten stappen, dat betekent dat er tussen elk opeenvolgend tweetal stations een directe verbinding is. De geografische route g bestaat dus uit opeenvolgende stationsparen S_i, S_{i+1} . Hierna wordt voor elk van de mogelijke geografische routes de bijbehorende paden in de dienstregeling gevonden. Hoe dit gaat, staat beschreven in Algoritme 2.

Het globale idee van het algoritme is als volgt: vanaf het startpunt S_1 wordt de trein in de dienstregeling gevonden die het eerst aankomt in het volgend station S_2 . Vervolgens zoekt het model vanaf dat station S_i weer de trein die het eerst aankomt in het daaropvolgende station S_{i+1} . Dit wordt

Input: Geografisch pad g , starttijd t
Output: Dienstregelpad d

```

1 foreach Pair  $S_i, S_{i+1} \in g$  do
2    $T :=$  Alle directe treinen van herkomst naar bestemming;
3    $a =$  Eerste aankomsttijd in  $S_{i+1}$  ;
4   foreach Trein  $t \in T$  do
5      $t_a =$  Aankomsttijd van trein  $t$  in  $S_{i+1}$ ;
6      $d_i =$  Trein van  $S_i$  naar  $S_{i+1}$  met eerste aankomst;
7     if  $t_a$  voor  $a$  then
8        $a = t_a$ ;
9        $d_i = t$ ;
10    end
11  end
12   $d+ = d_i$ 
13 end
14 return  $d$ ;

```

Algoritme 2: Algoritme voor het vinden van dienstregelpaden bij geografische routes

herhaald tot het laatste station van de geografische route g , oftewel de bestemming, is bereikt. Dit komt overeen met het invullen van de reisplanner op de manier van Figuur 5.3. De reizigers volgen dit pad vervolgens in de reizigersgraaf.

Het model heeft voor elk stationspaar alle directe treinen opgeslagen in de verzameling T . Uit alle directe verbindingen kiest het model de verbinding met de eerste aankomsttijd die vertrekt na de huidige tijd. Hierbij is de huidige tijd bij het begin van het algoritme de starttijd, en na elke gevonden directe verbinding is het de bijbehorende aankomsttijd. Als elk paar opeen-

Figuur 5.3: Het vinden van een pad in de dienstregeling van S_1 naar S_2 na tijdstip t

volgende stations is behandeld, is het bijbehorende pad in de dienstregeling gevonden.

5.4 Stap 3. Verdeling reizigers over paden

Na de eerste twee stappen zijn er voor elk van de geografische paden bijbehorende paden in de dienstregeling gevonden. Afhankelijk van de situatie verdeelt het model de reizigers als volgt over de gevonden paden.

Onverstoorde situatie

Wanneer er geen verstoring is, gaat het model ervan uit dat reizigers altijd op het kortste pad zitten. Het kortste pad is in deze context de treinen waarmee reizigers het eerst aankomen op hun bestemming. Er is geen reden om aan te nemen dat reizigers niet op hun kortste pad zitten, omdat er op dat moment geen onzekerheid in de dienstregeling is. Voor RHO is de aanname dus dat het gewenste pad in een onverstoorde situatie voor alle reizigers het pad in de dienstregeling is met de vroegst mogelijke aankomst.

Verstoorde situatie

In het geval van een verstoring heeft de reiziger niet alle informatie en spelen er nog andere factoren mee om een bepaald pad te kiezen. Een voorbeeld hiervan is dat overstappen in geval van een verstoring meer risico met zich meebrengt, daarom zullen reizigers dit vaker vermijden. Bij een verstoring stuurt RHO de reizigers volgens een logit verdeling over de paden in de dienstregeling. Aan elk dienstregelpad kent het model kosten toe, en aan de hand van deze kosten worden reizigers verdeeld over de paden.

De kosten c_i voor pad i zijn als volgt gedefinieerd:

$$c_i = rt + b(wt) + \sum_{k=1}^m \frac{30}{\text{frequentie}_k} \quad (5.1)$$

De formule bestaat uit drie delen.

1. *Kosten voor de reistijd* rt
2. *Correctie op de wachttijd* $b(wt)$ Reizigers ervaren dezelfde tijd als langer wanneer ze wachten dan wanneer ze in de trein zitten. Om deze reden wordt de wachttijd niet één op één overgenomen. Het bedrijf Booz heeft hier onderzoek naar gedaan, alle gecorrigeerde wachttijden zijn te vinden in Tabel A.1 in de bijlage. Grofweg komt het neer op een verdubbeling voor wachttijden onder de tien minuten.

3. *Kosten voor een overstap* Overstappen is vervelend omdat het extra moeite kost en een onzekerheid oplevert. Voor elk van de m overstappen komt er een boete bij van $\frac{30}{frequentie}$. De frequentie geeft aan hoe erg het is om de overstap te missen, de extra kosten zijn namelijk de helft van de maximale wachttijd. Een frequentie van twee, dus ieder halfuur, geeft namelijk extra kosten vijftien.

Als voor ieder pad de kosten zijn berekend, is de kans op pad i als volgt:

$$P(i) = \frac{\exp^{\alpha \times c_i}}{\sum_{j=1}^n \exp^{\alpha \times c_j}} \quad (5.2)$$

Dit is de formule van de logit verdeling, de theorie hierachter is te vinden in Ben-Akiva and Lerman (1985), waarbij n het totaal aantal paden is en α een constante. In het openbaar vervoer is een α van -0,03 gebruikelijk.

Wanneer de kansen voor elk pad bekend zijn, verdeelt het model de reizigersgroepen volgens deze kansen over de paden. Dus $P(i) \times AantalReizigers$ gaat over pad i . Als gevolg hiervan kunnen er ook fractionele reizigers in het systeem reizen.

Hoofdstuk 6

Opzet van RHO

Dit hoofdstuk behandelt de opzet van het model. De schematische weergave van het model komt aan bod en er wordt uitgelegd hoe verstoringen, informatie en capaciteit in RHO gemodelleerd zijn.

6.1 Schematische weergave model

Deze sectie geeft een schematische weergave van RHO, om te laten zien wat het model nodig heeft en wat het teruggeeft. In Figuur 6.1 is RHO met de in- en uitvoer schematisch weergegeven.

Invoer

Dienstregeling

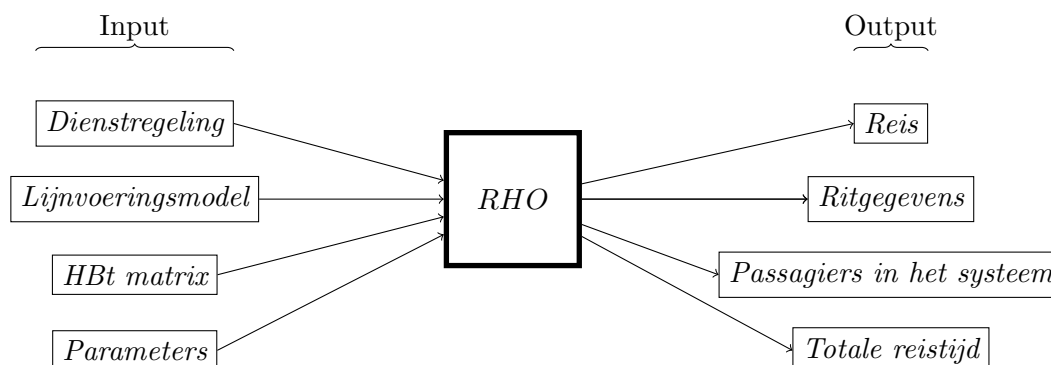
In de dienstregeling staan alle treinen waar de reiziger gebruik van kan maken, dus de vertrektijd en het vertrekstation en de aankomsttijd en het aankomststation. Er kan slechts één dienstregeling worden ingelezen. Om verstoringen te simuleren krijgt elke rit uit de dienstregeling een bijbehorende status. Dit is nader toegelicht in Sectie 6.2.

Lijnvoeringsmodel

Het reizigersmodel gebruikt het lijnvoeringsmodel om de relevante geografische paden af te leiden. Voor elk van de geografische paden bepalen reizigers de bijbehorende specifieke treinen.

Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd

De Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd bevat voor elk moment van de dag hoeveel reizigers van het ene station (herkomst) naar het andere station (bestemming) willen. Hierbij staat niet van welke specifieke treinen ze gebruik willen maken.



Figuur 6.1: Schematische weergave van de in- en uitvoer van RHO

Naast de matrix met alle reizigers kan het model ook een matrix krijgen met de reizigers waarvan de resultaten getoond moeten worden. Zo kunnen alleen de resultaten voor de geraakte reizigers berekend worden, omdat niet alle reizigers last hebben van een verstoring.

Parameters

Parameters omvat alle niet-noodzakelijke invoer van RHO zoals de capaciteit van treinen en de strategie van de reizigers. De capaciteit kan oneindig zijn, maar ook de maximaal mogelijke capaciteit van een trein of de capaciteit volgens de planning. Daarnaast bevatten de parameters de treinen die worden opgeheven en wanneer de reizigers dit horen, deze onderdelen worden verder toegelicht in Sectie 6.2.

Uitvoer

Met deze invoer simuleert het model de reizigersstromen en geeft de volgende uitvoer:

Reis

Het model laat elke afgelegde reis zien, inclusief reizen die zijn afgebroken omdat de deadline al was bereikt. Daarnaast geeft het model weer bij welke ritten hoeveel reizigers geweigerd zijn. Van deze reizigers is ook bekend waar ze vandaan komen, hoe laat ze zijn vertrokken en waar ze naartoe gaan.

Reizigers per rit

Voor elke rit staat welke houder er met hoeveel reizigers is meegereisd.

Totale reistijd

Het model toont de totale reistijd van alle reizigers opgeteld. De totale vertraging van de reizigers is vervolgens de totale reistijd in een verstoorde situatie minus de totale reistijd in een onverstoorde situatie.

Reizigers in het systeem

RHO weet op elk tijdstip hoeveel reizigers in het netwerk zijn en waar deze reizigers zich bevinden. Op een bepaald tijdstip kan RHO aangeven hoeveel reizigers zich op elk station en op elk traject bevinden. Het aantal reizigers op een traject is de som van alle reizigers in de treinen op dat traject, dus niet per specifieke trein.

Het aantal reizigers in het systeem kan bijvoorbeeld gebruikt worden om verschillende situaties te vergelijken. Bij een verstoring hebben veel reizigers een langere reistijd en blijven ze dus langer in het systeem. Op een gegeven moment zullen er na het begin van een verstoring dus meer reizigers in het systeem zijn dan op hetzelfde tijdstip in een onverstoorde situatie. Het verschil tussen het aantal reizigers in het systeem geeft het aantal vertraagde reizigers weer.

6.2 De wereld van het model

Het model RHO bestaat uit diverse componenten, zoals een verstoring, de informatie hierover en de capaciteit. Deze sectie bevat een nadere toelichting over deze componenten.

Netwerk

Het netwerk bestaat uit een lijnvoering en een dienstregeling. De lijnvoering beschrijft welke treinseries er zijn en met welke frequentie de stations op elke lijn worden aangedaan. Met behulp van het lijnvoeringsmodel worden de geografische routes bepaald, dit staat beschreven in ???. De dienstregeling is een lijst ritten waarbij elke rit de volgende eigenschappen heeft:

- Beginstation en -tijd
- Eindstation en -tijd
- Treinnummer

Een trein stopt doorgaans op meerdere stations. Elk stuk tussen twee stations wordt beschreven door één rit. Een specifiek treinnummer bestaat dus uit meerdere ritten, één rit tussen elke twee stations waar de trein stop. Het begin- en eindstation van een rit komen doorgaans dus niet overeen met het begin- en eindstation van dat treinnummer.



Figuur 6.2: Het netwerk

Verstoring

Om reizigersstromen bij een verstoring te modelleren, moet het mogelijk zijn om verstoringen in RHO te simuleren. RHO bootst verstoringen na door aan elke rit een status toe te kennen. Deze status geeft aan of een rit wel of niet rijdt. Het is op elk moment mogelijk om de status van een rit aan te passen. Op deze manier kan zowel een verstoring gesimuleerd worden als de verwachting van reizigers beïnvloed worden.

Wanneer er een statuswijziging doorgevoerd wordt, zijn alle reizigers hier direct van op de hoogte. Zij berekenen daarop opnieuw hun route met de nieuwe gegevens. Een verstoring van 16:00 uur - 19:00 uur op een bepaald traject wordt dan als volgt het gesimuleerd:

- *16:00 uur* Statuswijziging: alle treinen die na 16:00 uur en voor 19:00 uur over het verstoorde traject zouden rijden, rijden niet op het verstoorde traject.

Voor het einde van een verstoring is geen statuswijziging nodig omdat er geen nieuwe informatie is. Bij een verstoring rijden treinen wel of niet, als de treinen rijden, rijden ze op tijd. Het is niet mogelijk om treinen met een vertraging te laten rijden.

Informatie

Met behulp van de ritstatussen kan worden bepaald hoeveel informatie de reiziger krijgt. RHO onthoudt alle ritten van de dienstregeling maar bepaald

aan de hand van de ritstatus of reizigers er wel of geen gebruik van kunnen maken. De reiziger kent namelijk alle ritstatussen. Op elk moment kunnen ritstatussen aangepast worden en daarmee de informatie aan de reiziger beïnvloed worden. Het verloop van een verstoring die van 16:00 uur - 19:00 uur duurt maar een oorspronkelijke verwachte duur van 2 uur had, ziet er dan als volgt uit:

- *16:00 uur* Statuswijziging: alle treinen die na 16:00 uur en voor 18:00 uur over het verstoorde traject zouden rijden, rijden niet op het verstoorde traject.
- *18:00 uur* Statuswijziging: alle treinen die na 16:00 uur en voor 19:00 uur over het verstoorde traject zouden rijden, rijden niet op het verstoorde traject..

Capaciteit

RHO kan op twee verschillende manieren capaciteit aan de treinen toekennen.

1. *Materieelplanning*
2. *Vaste waarde voor alle treinen*

Het gebruiken van een materieelplan is realistischer want het ligt dichterbij de werkelijkheid dan dat alle treinen dezelfde capaciteit hebben. Het gebruiken van een vaste capaciteit voor alle treinen is echter veel sneller. Om verschillende capaciteiten te testen hoeven er nu namelijk niet verschillende materieelplanningen gemaakt te worden.

Bij het verwerken van de invoer komen de capaciteiten vast te staan. Het wijzigen van capaciteiten op een later tijdstip kan met behulp van een statuswijziging. Van deze mogelijkheid is in dit onderzoek geen gebruik gemaakt.

Overstappen

Sectie 5.4 behandelt de manier waarop reizigers kosten toekennen aan paden. Hierbij zijn de kosten voor overstappen afhankelijk van de frequentie. In RHO is het mogelijk om reizigers op verschillende manieren de kosten voor overstappen te laten toekennen, zoals een vaste boete voor elke overstap of om de kosten voor overstappen af te laten hangen van de reistijd.

Hoofdstuk 7

Methoden

7.1 Data

Alle testcases zijn gebaseerd op een doordeweekse dag in de dienstregeling van 2012. Deze bestaat uit 54.692 ritten. In deze scriptie is een rit elk stuk tussen twee stations waar de betreffende trein stopt, op de website van NS is een rit van beginstation tot eindstation, ongeacht het aantal stops onderweg. De dienstregeling van 2012 bestaat dan uit 4.800 ritten. Alle testcases bevatten 53.917 reizigersgroepen opgeschaald naar 1.190.812 reizigers in totaal. Dit totale aantal reizigers komt ongeveer overeen met het werkelijke aantal, zoals te lezen op de website van NS. Uit OV-Chipkaart gegevens is af te leiden hoeveel reizigers op welk tijdstip van welk station naar welk ander station willen reizen, dit is de Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd. Omdat nog niet alle reizigers gebruikmaken van de OV-Chipkaart, is dit aantal vervolgens vermenigvuldigd met $\frac{1}{\%OV\text{-Chipkaartreizigers}}$ om zo het totaal aantal reizigers te krijgen.

Daarnaast is het model ook gerund met de testcases van Nielsen, omdat op deze manier getest kan worden of het model correct is nagebouwd. Deze testcases bevatten een vereenvoudigd spoornetwerk, alleen de kern van het intercitynetwerk is hierin opgenomen. Het netwerk bevat veertien stations en zestien treinseries, met in totaal 2.324 ritten.

Afhankelijk van het geteste onderwerp wordt er gevarieerd met de verschillende verstoringen, capaciteit, informatie en de kosten die reizigers aan een pad toekennen.

7.2 Capaciteit

Alle tests zijn uitgevoerd met een onbeperkte en met een beperkte capaciteit. Uit de reizigersstromen met onbeperkte capaciteit kan de minimale extra reistijd worden gehaald omdat er geen capaciteitsrestrictie is. Daarnaast geven de reizigersstromen met beperkte capaciteit een realistischer

beeld omdat er geen oneindige capaciteit is. De beperkte capaciteit is zo gekozen dat er in een onverstoorde situatie geen reizigers geweigerd worden. Geweigerde reizigers tijdens een verstoring pasten in een onverstoorde situatie dus wel in de trein.

Door alle OV-Chipkaart reizigers uit de Herkomst/Bestemmingsmatrix op tijd, te vermenigvuldigen met dezelfde factor klopt het totaal aantal reizigers over de dag wel, maar komt de verdeling over de treinen niet overeen met de werkelijkheid. Dit komt omdat het percentage OV-Chipkaart reizigers per trein verschilt. De voornaamste oorzaak hiervoor zijn de studentenkaarten, elke student moet namelijk verplicht in- en uitchecken. Met name in de zogenoemde studententreinen ligt het percentage studenten veel hoger dan gemiddeld, dit zijn treinen die voornamelijk aan het begin en einde van de dag aankomen bij steden met een universiteit. Omdat het percentage veel hoger ligt dan gemiddeld, geeft ophoging met een standaard factor een grote overschatting van het aantal reizigers op die treinen. Het gaat om 64 ritten, dat is minder dan 0,2% van het totaal aantal ritten. Dit levert een aantal geweigerde reizigers op in het programma die er in werkelijkheid niet zullen zijn.

7.3 Verstoringen

Het programma is getest met drie verschillende verstoringen. De trajecten van deze verstoringen zijn Utrecht - Amsterdam, Den Haag - Rotterdam en Utrecht - Amersfoort, ook te zien in Figuur 7.1. Alle verstoringen zijn getest tijdens de middagspits van 16:00 uur tot 19:00 uur, daarnaast is tussen Den Haag en Rotterdam ook in het dal getest met een verstoring van 11:00 uur tot 14:00 uur.

Naast dat er vanzelfsprekend met één verstoring per keer getest is, zijn er ook verstoringen tegelijkertijd getest. De combinatie van Den Haag - Rotterdam en Amsterdam - Utrecht zorgt er echter voor dat reizigers geen alternatieve route meer hebben, waardoor de resultaten hiervan niet bruikbaar zijn.

7.4 Informatie

Om te testen wat de invloed is van informatie op de reizigersstromen, is er gevarieerd met de verwachte duur van een verstoring. De werkelijke duur van een verstoring is bijvoorbeeld drie uur, maar wanneer reizigers eerst horen dat het korter of langer duurt, zullen ze andere keuzes maken dan wanneer de werkelijke duur bekend is. Daarnaast is het moment van dat reizigers informatie krijgen ook interessant. Wanneer reizigers verwachten dat de verstoring twee uur duurt en na twee uur horen ze dat de verstoring



Figuur 7.1: De geteste verstoringen

	Bericht 1		Bericht 2	
Scenario	Tijdstip	Gegeven eindtijd	Tijdstip	Gegeven eindtijd
2 uur	16:00 uur	18:00 uur	18:00 uur	19:00 uur
3 uur	16:00 uur	19:00 uur	-	-
4 uur	16:00 uur	20:00 uur	19:00 uur	19:00 uur

Tabel 7.1: Tabel met de informatie die reizigers krijgen voor een verstoring tussen 16:00-19:00 uur

nog een uur langer duurt, geeft dit een ander resultaat dan wanneer ze dit reeds een uur eerder wisten.

In Tabel 7.1 zijn voor de geteste verstoringen uit Sectie 7.3 uiteengezet op welk tijdstip reizigers welke informatie krijgen. De verstoring duurt van 16:00 - 19:00 uur en reizigers krijgen de werkelijke duur van de verstoring te horen op het laatst mogelijke moment. Daarnaast is er gevarieerd met het moment dat de werkelijke duur van de verstoring bekend is.

7.5 KPI's

Er zijn twee key performance indicators waarmee de invloed van capaciteit en informatie in dit onderzoek gemeten wordt.

1. *Reistijd* Een verstoring zorgt voor vertraging. Natuurlijk hebben de reizigers die normaal gesproken over het verstoorte traject reizen ver-

traging. Maar wanneer treinen zo vol zitten dat reizigers niet mee kunnen, zorgt dit voor extra vertraging.

2. *Aantal keer geweigerd* Reizigers ervaren een volle trein of, nog erger, niet mee kunnen met de trein omdat deze al vol zit als zeer vervelend. Het aantal keer dat een reiziger geweigerd wordt omdat de trein al vol zit, is dus een goede aanvulling op de reistijd als KPI.

Hoofdstuk 8

Resultaten

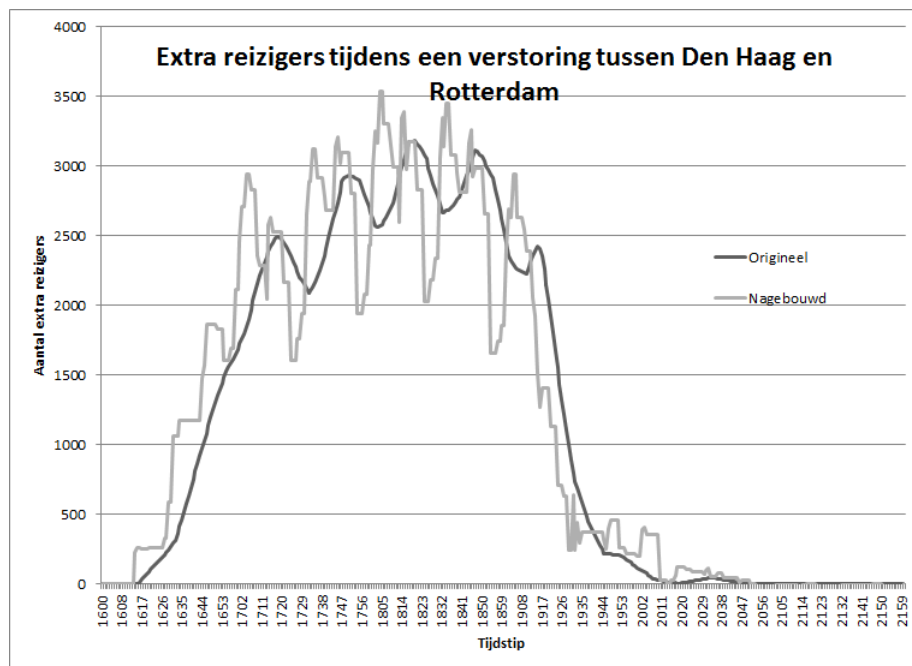
De resultaten van diverse tests met RHO worden behandeld in dit hoofdstuk. Om te beginnen wordt gevalideerd dat RHO overeenkomt met het model van Lars Nielsen. Vervolgens worden de onderzoeksvragen betreffende de invloed van informatie en capaciteit besproken. Ten slotte is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de kosten die reizigers toekennen aan overstappen.

8.1 Vergelijking model Nielsen

De eerste stap was om het reizigersmodel van Lars Nielsen na te bouwen. In dit model zitten reizigers altijd op het kortste pad en weten ze bij het begin van een verstoring precies hoe laat deze afgelopen is en welke treinen hierdoor niet rijden. Dat er een verstoring plaatsvindt, is wel onverwachts. In deze sectie wordt gekeken of beide modellen inderdaad dezelfde resultaten geven.

Het originele en het nagebouwde model zijn vergeleken op het aantal extra reizigers tijdens een verstoring. Op elke minuut is gemeten hoeveel reizigers zich in het systeem bevinden, het aantal extra reizigers tijdens een verstoring is vervolgens voor elk tijdstip het aantal reizigers in een verstoorde situatie minus het aantal reizigers in een onverstoorde situatie. Het aantal extra reizigers tijdens een verstoring geeft een indicatie van het gevolg van een verstoring, deze reizigers hebben namelijk allemaal vertraging opgelopen.

In Figuur 8.1 zijn de extra reizigers tijdens een verstoring tussen 16:00 uur en 22:00 uur geplot voor het originele en nagebouwde model. De verstoring is van 16:00 uur - 19:00 uur tussen Den Haag en Rotterdam in het vereenvoudigde spoornetwerk. Beide lijnen hebben ongeveer dezelfde waarden, alleen de fluctuaties zijn bij het nagebouwde model groter. Deze fluctuaties komen door het patroon van de aankomst- en vertrektijden in de dienstregeling. Van elk kwartier komen de eerste 7,5 minuut meer trei-



Figuur 8.1: Het aantal extra reizigers bij een verstoring in het originele en nagebouwde model

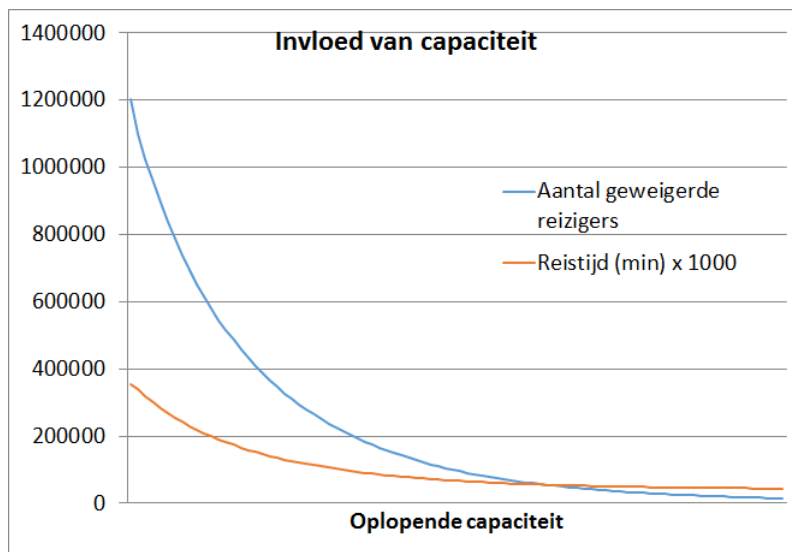
nen aan dan er vertrekken en in de tweede 7,5 minuut meer treinen dan er aankomen. Treinen die aankomen zorgen ervoor dat er reizigers uit het systeem verdwijnen, mensen komen immers op hun bestemming aan en hoeven niet meer te reizen. Treinen die vertrekken nemen reizigers mee vanaf hun startstation, daarom komen er reizigers in het systeem bij.

Uit dit figuur blijkt dat het nagebouwde model goed overeen komt met het originele model. De overige resultaten betreffen uitbreidingen op dit model, waarbij gevarieerd wordt met capaciteit, informatie en de kosten voor het overstappen. Deze uitbreidingen komen niet in het model van Nielsen voor.

8.2 Invloed van capaciteit

8.2.1 Onverstoorde situatie

Ten eerste is er gevarieerd met de capaciteit in een onverstoorde situatie, om een indruk te krijgen of capaciteit al invloed heeft wanneer er geen verstoring plaatsvindt. In Figuur 8.2 zijn de reistijd en het aantal geweigerde reizigers uitgezet tegen de capaciteit. De capaciteit is altijd voor alle treinen gelijk. Op de y-as staat het aantal geweigerde reizigers en de totale reistijd in



Figuur 8.2: Reistijd en aantal geweigerde reizigers bij een onverstoorde situatie

minuten. De totale reistijd is gedeeld door een factor 1000 om beide factoren in één grafiek te kunnen tonen.

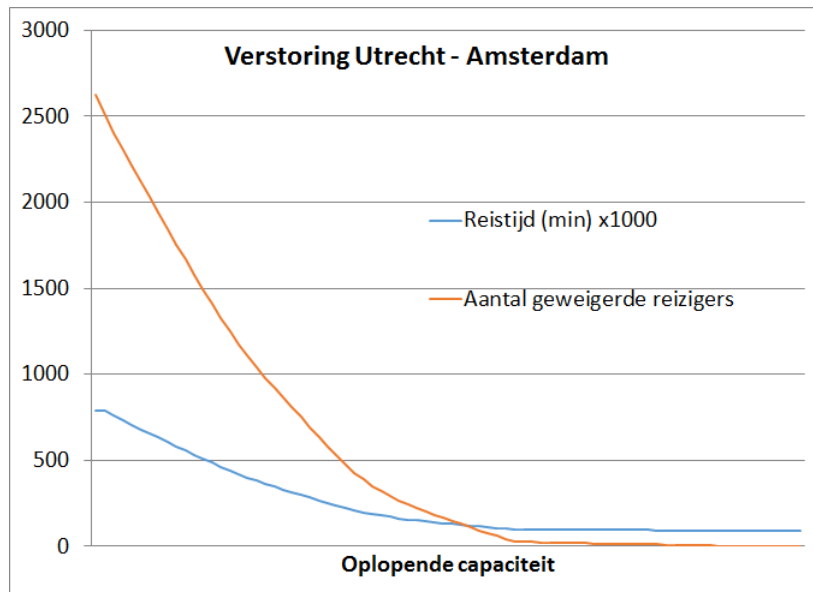
De geteste capaciteiten zijn niet op de x-as te zien, dit komt omdat het geen realistische capaciteiten zijn. De in Sectie 7.2 genoemde onrealistische verdeling van reizigers is hiervoor de aanleiding. Dit geeft namelijk een vertekend beeld van de benodigde capaciteit.

Uit de figuur is af te leiden dat de reistijd en het aantal geweigerde reizigers even sterk blijven reageren op een verandering in de capaciteit, ongeacht de grootte van de capaciteit per trein. Dit houdt in dat er geen punt of gebied is dat een verkleining van de capaciteit een grotere verslechtering oplevert dan op een ander punt, of een punt waar vergroting van de capaciteit meer verbetering oplevert dan een ander punt.

8.2.2 Verstoorde situatie

De verwachting is dat als de capaciteit kleiner wordt, de reistijd en het aantal geweigerde reizigers explosief toeneemt omdat de problemen opstapelen. Wanneer reizigers geweigerd worden, geeft dit extra reizigers voor de volgende trein, die misschien ook al te weinig capaciteit had, enzovoorts.

In Figuur 8.3 zijn de resultaten getoond bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam. Hier is volgens verwachting te zien dat het aantal geweigerde reizigers veel sneller stijgt dan de capaciteit daalt. De reistijd neemt ook toe, maar minder sterk dan het aantal geweigerde reizigers.



Figuur 8.3: Reistijd en aantal geweigerde reizigers bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam

8.3 Invloed van informatie

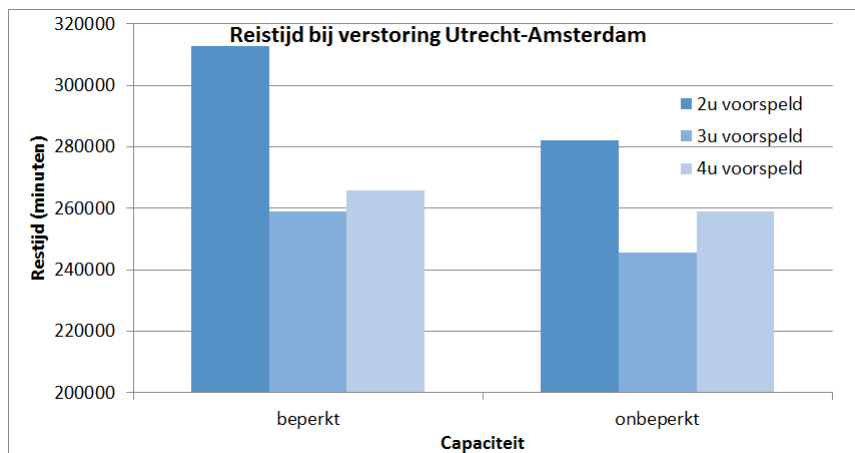
Wat betreft informatie ligt in dit onderzoek de focus op de verwachte duur van de verstoring en het moment waarop reizigers de werkelijke verwachte duur van de verstoring te horen krijgen.

8.3.1 Andere verwachting

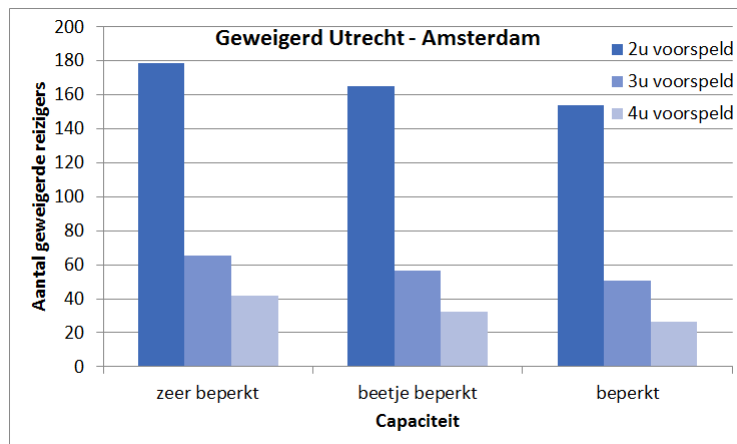
In Figuur 8.4 is de reistijd te zien bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam die van 16:00 uur tot 19:00 uur duurt. Op de y-as staat de reistijd. De drie linker kolommen geven de reistijd bij beperkte capaciteit aan, de drie rechter kolommen de reistijd met onbeperkte capaciteit. Elke van de drie kolommen geven van links naar rechts respectievelijk 2, 3 en 4 uur voorspelde duur weer. Hoe laat reizigers welke informatie krijgen, is te zien in Tabel 7.1.

De reistijd in de kolom van 3 uur voorspeld is de minimale reistijd. Als er vanaf het begin de juiste informatie werd gegeven, is dat het resultaat. De extra reistijd bij 2 uur voorspeld en 4 uur voorspeld zijn dus het gevolg van onjuiste informatie. In Figuur 8.4 is te zien dat de extra reistijd groter is wanneer de verstoring wordt onderschat dan wanneer deze wordt overschat.

Wanneer reizigers verwachten dat de verstoring bijna voorbij is, zullen ze op de eerste trein over het verstoorte traject wachten, omdat dit op een gegeven moment sneller is dan omreizen. Als dan blijkt dat verstoring nog lang niet is afgelopen, moeten die reizigers alsnog omreizen. Bij beperkte



Figuur 8.4: Reistijd bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam



Figuur 8.5: Het aantal geweigerde reizigers bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam

capaciteit zorgt dit nog voor veel langere reistijd omdat die extra grote groep niet in de trein op de omreisroute past. De extra reistijd bij een verwachte duur van 4 uur komt omdat reizigers al omreizen en te laat horen dat het sneller was geweest om te wachten op de eerste trein over het verstoorde traject.

Voor dezelfde verstoring zijn de geweigerde reizigers geplott in Figuur 8.5. Bij een onbeperkte capaciteit zijn er geen geweigerde reizigers, daarom is er met drie verschillende capaciteiten getest. Deze capaciteiten zijn ondergebracht in de categorieën zeer beperkt, beetje beperkt en beperkt. Ook in deze grafiek geldt dat drie kolommen van links naar rechts respectievelijk 2 uur voorspeld, 3 uur voorspeld en 4 uur voorspelde duur weergeven.

Het aantal geweigerde reizigers is opvallend genoeg het laagst wanneer er voorspeld is dat de verstoring vier uur duurt in plaats van de werkelijke drie uur. Wanneer voorspeld is dat de verstoring twee uur duurt, is het aantal geweigerde reizigers vele malen groter dan bij drie of vier uur.

Er zijn geen opvallende verschillen tussen de verschillende capaciteiten, het aantal geweigerde reizigers neemt zoals verwacht af naarmate de capaciteit groter wordt. Het grote aantal geweigerde reizigers wanneer er voorspeld wordt dat de verstoring twee uur duurt in plaats van drie uur, kan verklaard worden door de ophoping van reizigers die wachten op de eerste trein na twee uur. Wanneer blijkt dat die trein niet rijdt, moet een extra grote groep over de omreisroute. Dit effect is er in kleinere mate wanneer er daadwerkelijk drie uur voorspeld is, ook in dat geval zullen er grotere groepen wachten op de eerste trein over het verstoorte traject. Bij een verwachte duur van vier uur is dat niet het geval.

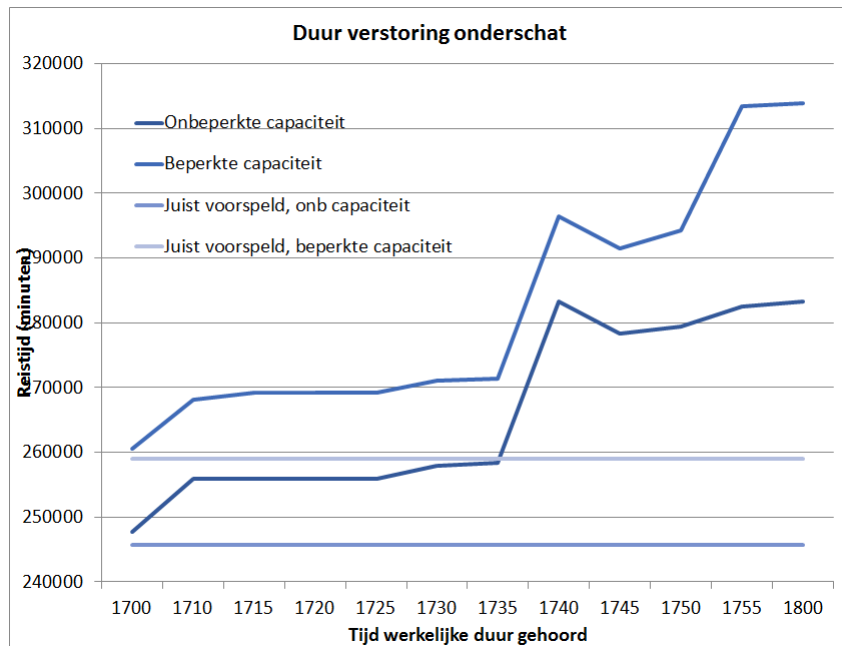
8.3.2 Moment

Bij de vorige tests is het moment dat de werkelijke duur van de verstoring bekend werd steeds twee of drie uur na het begin van de verstoring geweest. Nu wordt er gevarieerd met het tijdstip waarop de werkelijke duur van de verstoring bekend is. Zo is het moment te bepalen waarop uiterlijk de werkelijke duur van de verstoring bekend moet zijn, omdat het anders invloed heeft op de reistijd.

In dit geval is getest met de verstoring tussen Utrecht en Amsterdam tussen 16:00 uur en 19:00 uur. Om 16:00 uur krijgen reizigers te horen dat verstoring om 18:00 uur afgelopen is. Vervolgens varieert het tijdstip dat reizigers de werkelijke duur van de verstoring horen tussen 17:00 uur en 18:00 uur. Hierbij is 18:00 uur het laatste mogelijke moment waarop reizigers de werkelijke duur van de verstoring kunnen horen, immers zou de verstoring op dat moment afgelopen zijn. Daarnaast is er getest met zowel onbeperkte als beperkte capaciteit.

In Figuur 8.6 is de reistijd uitgezet tegen het tijdstip dat de werkelijke duur van de verstoring bekend is. De twee horizontale lijnen geven de reistijd weer wanneer er vanaf het begin bekend was dat de verstoring drie uur zou duren. De oplopende lijnen geven de reistijd weer als er om 16:00 uur is aangegeven dat de verstoring twee uur duurt en op tijdstip x bekend is dat de verstoring toch drie uur duurt. Van deze twee paren lijnen geeft de bovenste de reistijd weer met beperkte capaciteit en de onderste de reistijd met onbeperkte capaciteit.

Zoals uit de figuur is af te leiden, ligt om 17:00 uur de reistijd vlak bij de minimale reistijd, vanaf dat punt loopt de reistijd alleen maar op. Tussen 17:35 uur en 17:40 uur neemt de reistijd enorm toe, en is zelfs hoger dan om 17:45 uur. Dit komt omdat er om 17:38 uur een trein om de omreisroute vertrekt. Reizigers die op tijd horen dat de verstoring niet tot 18:00 uur maar



Figuur 8.6: Reistijd bij verschillend moment van werkelijke duur verstoring bekend bij een verstoring tussen Utrecht en Amsterdam

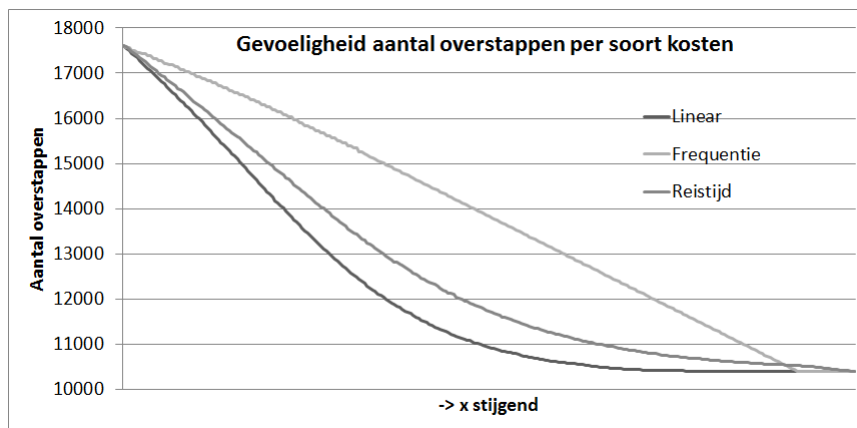
tot 19:00 uur duurt, kunnen nog van deze trein gebruik maken. Wanneer pas om 17:40 uur bekend is dat de verstoring langer duurt, hebben reizigers precies de trein op de omreisroute gemist en wordt hun reistijd dus veel langer.

8.4 Gevoeligheidsanalyse op kosten toewijzen pad

Sectie 5.4 bespreekt verschillende manieren om reizigers over paden te verdelen. In een van deze manieren kennen reizigers kosten toe aan elk dienstregelpad. Die kosten zijn opgebouwd uit kosten voor de daadwerkelijke tijd in de trein, kosten voor wachttijd en kosten voor overstappen. Deze sectie behandelt de invloed van de manier waarop die kosten worden berekend. Aangezien de verhouding tussen de kosten voor tijd in de trein en ervaren wachttijd wetenschappelijk onderbouwd zijn, zie Sectie 5.4, gaat dit stuk alleen verder in op de kosten voor overstappen. Reizigers worden dus nog steeds verdeeld over de paden volgens het logit principe, maar veranderen hier alleen de kosten die aan overstappen toegekend worden.

De kosten voor overstappen zijn op drie verschillende manieren berekend.

1. *Frequentie* In dit onderzoek kennen reizigers kosten aan een pad toe door voor elke overstap $\frac{30}{frequentie}$ toe te voegen, zoals besproken in



Figuur 8.7: Verschillende manieren om overstappen te berekenen vergeleken

5.4. In de gevoeligheidsanalyse wordt gevarieerd met x in palats van het getal 30.

2. *Lineair* Elke overstap heeft dezelfde boete x .
3. *Reistijd* Het idee achter de kosten voor overstappen af laten hangen van de reistijd, is dat als de totale reistijd langer is, het minder erg voelt om over te stappen. De totale reistijd wordt in dit geval vermenigvuldigd met factor x .

Alle tests zijn uitgevoerd met een gedeelte van het vereenvoudigde spoor-netwerk, hierbij zijn zes van de veertien stations meegenomen en het minimaal aantal overstappen hierbij is 10.407. De waardes van x zijn voor elke manier zo gekozen dat het aantal overstappen uiteindelijk dit minimum bereikt.

Om de verschillende manieren van het toekennen van kosten aan overstappen met elkaar te vergelijken, zijn in Figuur 8.7 het totaal aantal overstappen voor elk van de drie manieren in één grafiek geplott. Elke manier heeft een ander interval van x , daarom is het niet mogelijk om waardes op de x-as te zetten. In plaats daarvan is ervoor gekozen om te werken met stappen, waarbij de eerste stap de x is met het hoogst aantal overstappen en in de laatste stap de x met het minimale aantal overstappen. Het minimaal aantal overstappen van 10.407 is het minimale aantal overstappen waarmee de reizen te maken zijn. De stapgrootte is dan $\frac{x_{maxOverstappen} - x_{minOverstappen}}{100}$, dus in 100 stappen is elke manier van het maximale aantal naar het minimale aantal overstappen. Op deze manier is te vergelijken hoe de drie manieren reageren op een verschil in x .

Van de drie manieren heeft Frequentie de gelijkmatigste daling. Reistijd en Lineair hebben ongeveer dezelfde vorm, maar Reistijd heeft in het begin een veel sterkere daling. Deze daling wordt bij zowel Reistijd als Lineair op

een gegeven moment minder sterk. Omdat Frequentie voor elke x even sterk reageert op een verandering in x , is dit een betrouwbare manier om kosten aan overstappen toe te kennen.

In de bijlagen staan de figuren waarin het aantal overstappen bij elk van de manieren afzonderlijk geplot is tegen x . Frequentie is te vinden in Figuur 8.7, Lineair in Figuur B.2 en Reistijd in Figuur B.3.

Om te onderzoeken welk van de drie manieren het dichtst bij de werkelijkheid is, kan er getest worden met OV-Chipkaartdata bij verstoringen. De verdeling van de werkelijke totale reistijd bij meerdere verstoringen wordt dan vergeleken met de verdeling van de totale reistijd die er uit de verschillende manieren zou komen. De hoeveelheid tijd die dit onderzoek kost, ligt echter voorbij de scope van dit onderzoek.

Hoofdstuk 9

Conclusie

De volgende onderzoeksvraag en deelvragen stonden bij deze scriptie centraal:

Wat is de invloed van informatie en capaciteit op de reizigersstromen bij een verstoring?

1. Hoe zijn reizigersstromen te modelleren?
2. Wat is de invloed van capaciteit bij een verstoring?
- 3a. Wat is de invloed van de geschatte verwachte duur van een verstoring?
- 3b. Wat is de invloed van het moment waarop reizigers de werkelijke duur van de verstoring horen?

Dit hoofdstuk behandelt elke onderzoeksvraag aan de hand van het uitgevoerde onderzoek. Naast de conclusies komen ook de aanbevelingen aan bod.

9.1 Onderzoeksvraag 1: Modelleren reizigersstromen

Het ontwikkelde model RHO kan gebruikt worden om reizigersstromen te modelleren. De theorie achter dit model staat beschreven in Hoofdstukken 4, 5 en 6. Dit model is niet alleen bruikbaar voor NS maar ook voor andere vervoerders.

9.2 Onderzoeksvraag 2: Invloed capaciteit

Het verwachte effect van de capaciteit op de reizigersstromen bij een verstoring is dat bij kleinere capaciteit de reistijd toeneemt. Uit dit onderzoek

blijkt daarnaast dat er geen omslagpunt is, dat wil zeggen dat er niet een punt of gebied is waarbij een vergroting of verkleining van de capaciteit meer invloed heeft dan op een ander punt. Dit is wel te zien bij het aantal keer dat een reiziger geweigerd is, dit aantal neemt zeer snel toe naarmate de capaciteit afneemt.

In dit onderzoek is de geteste capaciteit voor elke trein hetzelfde geweest, dit is geen realistische situatie. Om de resultaten van dit onderzoek verder te toetsen, dient er daarom verdere analyse uitgevoerd te worden met realistische zitplaatscapaciteiten.

9.3 Onderzoeksvraag 3: Invloed informatie

In dit onderzoek is wat betreft informatie gekeken naar de verwachte duur van een verstoring en de gevolgen van het onder- of overschatten van de duur van een verstoring. Daarnaast behandelt onderzoeksvraag 3a het moment waarop reizigers de werkelijke duur van een verstoring te horen krijgen.

9.3.1 Tijdsduur

Wat betreft de verwachte duur van een verstoring kan er een duidelijke conclusie getrokken worden: onderschatten is erger dan overschatten. Dit geldt zowel voor de reistijd als voor het aantal keer dat een reiziger geweigerd is. De verklaring hiervoor is dat er reizigers wachten op de eerste trein na de verstoring. Als dan blijkt dat de verstoring nog een uur langer duurt, moet deze groep als extra reizigers alsnog over de omreisroute.

9.3.2 Moment

Daarnaast is ook het moment waarop de werkelijke duur van de verstoring bekend is van belang. Natuurlijk geldt dat hoe eerder de werkelijke duur bekend is, hoe beter. Daarnaast zijn er een aantal specifieke tijdstippen van belang, namelijk de vertrektijden van de treinen op de omreisroutes. Als vlak na het vertrek van de trein op de omreisroute bekend wordt dat de verstoring langer duurt dan verwacht, nemen zowel de reistijd als het aantal geweigerde reizigers enorm toe. De reistijd neemt toe omdat de reizigers die gewacht hebben nu alsnog met volgende trein op de omreisroute mee moeten. Het aantal geweigerde reizigers neemt toe omdat het aantal reizigers bestemd voor twee treinen nu met één trein moet reizen. Hier is niet altijd plek voor.

9.4 Aanbevelingen

Een belangrijk resultaat van dit onderzoek is het model RHO waarmee het mogelijk is reizigersstromen te simuleren op een volledige dienstregeling en instelbare omstandigheden zoals verstoringen, informatie en capaciteit. Het

model is niet slechts toegepitst op één situatie of één dienstregeling maar op veel verschillende manieren toepasbaar. De volgende secties bespreken enkele interessante en nuttige toepassingen.

9.4.1 Verder onderzoek

Op dit moment is het al mogelijk om verder onderzoek te doen naar het aantal reizigers dat zich in het systeem bevindt, dit geeft een indicatie van de gevolgen van een verstoring. Het aantal reizigers in het systeem is op elk moment uit te splitsen naar traject of station. Het wordt aanbevolen om verder onderzoek hierop uit te voeren om een gedetailleerder beeld van de gevolgen van een verstoring te krijgen.

Daarnaast wordt aanbevolen om RHO te gebruiken in combinatie met het materieeplanningsprogramma. Het is al mogelijk om in RHO materieelplannen in te lezen, dus het gebruik hiervan om iteratief materieelplannen te optimaliseren op de reizigersstromen is een kleine stap. Op deze manier kunnen er analyses uitgevoerd worden met realistische zitplaatscapaciteiten.

9.4.2 Uitbreidingen aan het model

Op dit moment kan een rit alleen wel of niet rijden, in werkelijkheid kan het ook voorkomen dat treinen vertraagd zijn of dat het onzeker is dat de trein rijdt. Wanneer vertragingen mogelijk zijn, kan er bijvoorbeeld getest worden of een oplopende vertraging van een aankomende trein zorgt voor een ophoping van reizigers op het station.

In werkelijkheid is het onzeker wat de eerste treinen zijn die na een verstoring over het geraakte traject rijden. Dit kan gemodelleerd worden door de kans dat een trein rijdt toe te voegen. Het mogelijk maken van vertragingen en de onzekerheid of treinen rijden, maken het model realistischer.

In dit onderzoek is slechts één type reiziger gemodelleerd, voor een realistischer model is het sterk aan te raden meerdere typen reizigers te modelleren. Deze reiziger weet alle informatie die in het systeem bekend is, reist in een onverstoorde situatie altijd met de trein die zo vroeg mogelijk op zijn eindbestemming aankomt en maakt in een verstoorde situatie een afweging aan de hand van de kosten die hij aan de mogelijke paden toekent. In werkelijkheid verschilt het gedrag per reiziger, zo zal een reiziger die een vliegtuig moet halen veel meer op de hoogte blijven van de gegeven informatie dan een reiziger die zijn dagelijkse treinreis naar huis maakt. Het wordt aanbevolen om RHO zodanig aan te passen dat er meerdere soorten reizigers verwerkt kunnen worden.

Bijlage A

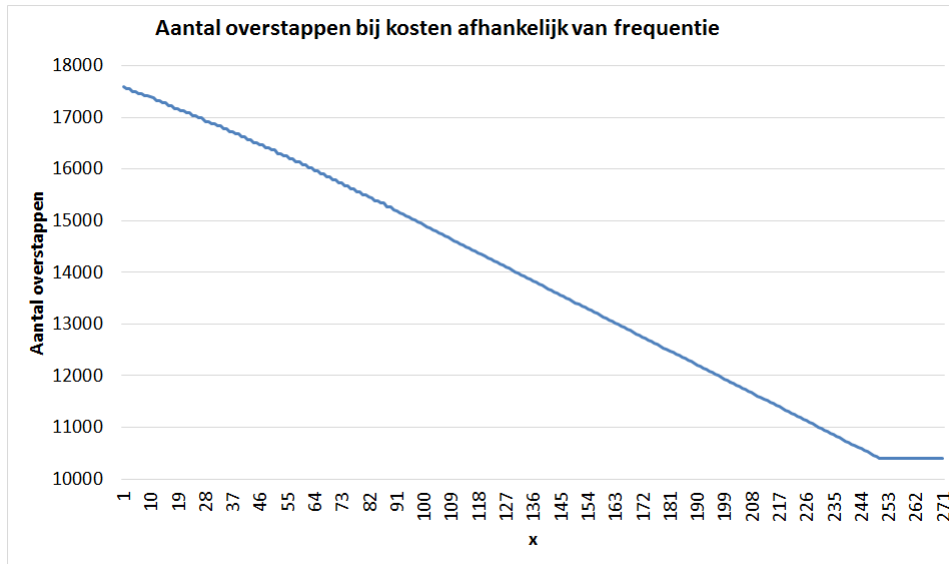
Gecorrigeerde wachttijden

Wachttijd (min)	Gecorrigeerde wachttijd (min)
30	39.0
29	38.3
28	37.5
27	36.5
26	35.8
25	35.0
24	34.3
23	33.5
22	32.5
21	31.8
20	31.0
19	30.0
18	29.0
17	28.0
16	27.0
15	26.0
14	25.0
13	24.0
12	23.0
11	21.0
10	19.0
9	17.5
8	16.0
7	14.0
6	12.0
5	10.0
4	8.0
3	6.0
2	4.0
1	2.0

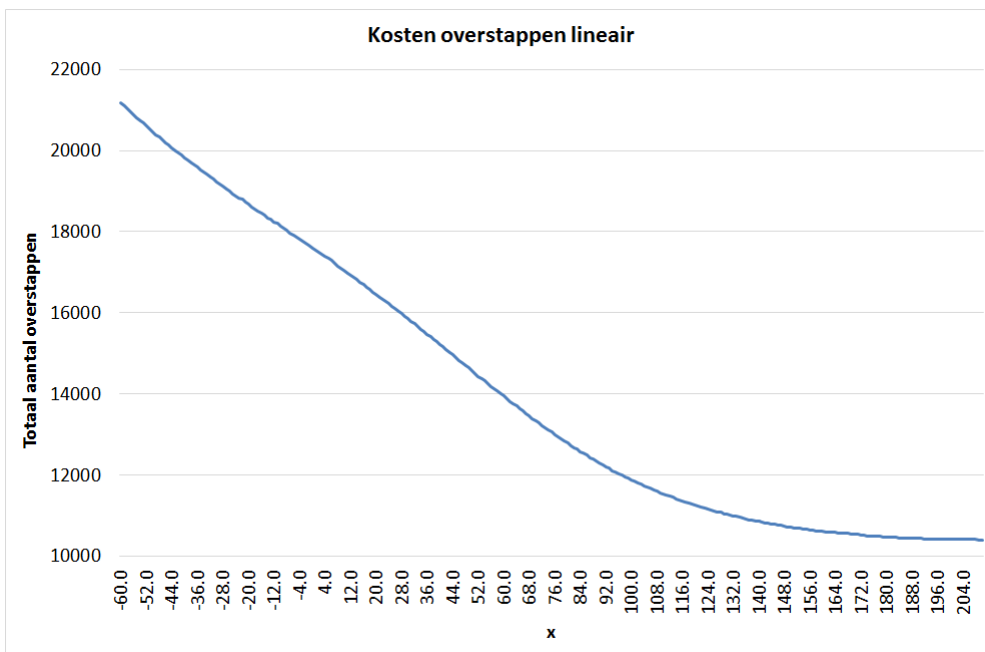
Tabel A.1: Gecorrigeerde wachttijd in minuten

Bijlage B

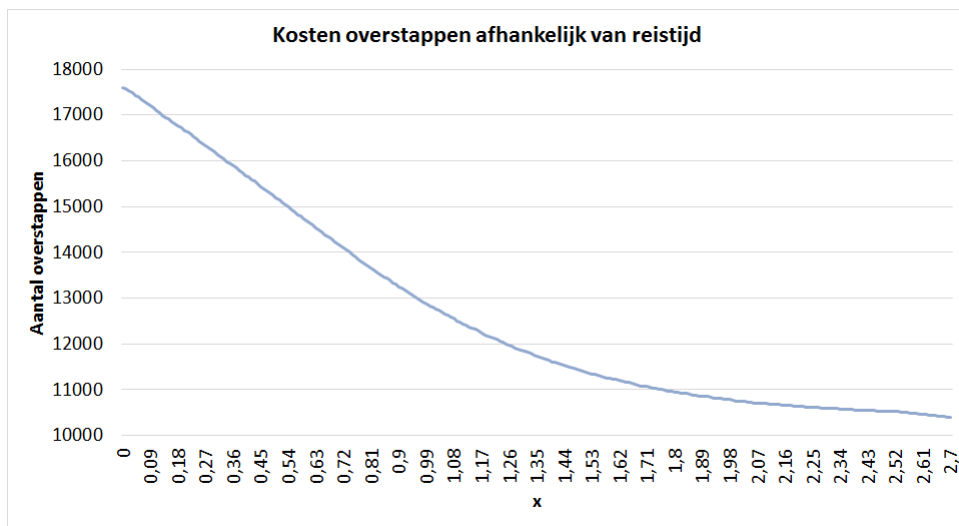
Verschillende kosten voor overstappen



Figuur B.1: Het aantal overstappen wanneer de kosten per overstap afhangen van de frequentie



Figuur B.2: Het aantal overstappen wanneer elke overstap x kost



Figuur B.3: Het aantal overstappen wanneer de kosten per overstap afhangen van de totale reistijd

Bibliografie

- Website NS: Gegevens over de dienstregeling. <http://www.ns.nl/reizigers/reisinformatie/informatie/sms-alert/wat-is-een-aangepaste-dienstregeling.html>. Accessed: 12/03/2013.
- M. Ben-Akiva and S. Lerman. *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*, volume 9. MIT press, 1985.
- O. Cats, H. N. Koutsopoulos, W. Burghout, and T. Toledo. Effect of real-time transit information on dynamic path choice of passengers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2217(-1):46–54, Dec. 2011.
- O. Cats, H. N. Koutsopoulos, and T. Toledo. Adaptive path choice decisions in public transport systems: An agent-based assignment model. 2012.
- C. G. Chorus, T. a. Arentze, and H. J. Timmermans. Information impact on quality of multimodal travel choices: conceptualizations and empirical analyses. *Transportation*, 34(6):625–645, May 2007.
- C. G. Chorus, T. a. Arentze, and H. J. Timmermans. A random regret-minimization model of travel choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(1):1–18, Jan. 2008.
- D. Ettema and H. J. Timmermans. Costs of travel time uncertainty and benefits of travel time information: Conceptual model and numerical examples. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(5):335–350, Oct. 2006.
- Q. Han, H. Timmermans, B. Dellaert, and F. van Raaij. Route choice under uncertainty: Effects of recommendations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2082(-1):72–80, 2008.
- J. D. Hunt. A logit model of public transport route choice. 1990.
- T. Jones. *Monty Python's Life of Brian*. 1979. “Yes, we’re all individuals”.

- J. Meyer. Two-moment decision models and expected utility maximization. *The American Economic Review*, pages 421–430, 1987.
- L. Nielsen. *Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways: Applications in short-term planning and in disruption management*. Erasmus University Rotterdam, 2011.